

# **INSTRUMENTAÇÃO INDUSTRIAL**

## **SENSORES E TRANSDUTORES**

**ÍNDICE**

INTRODUÇÃO .....	05
SENSORIAMENTO .....	07
DEFINIÇÕES FUNDAMENTAIS .....	07
Sensor .....	08
Transdutor .....	08
Sensores Discretos .....	08
Sensores Absolutos .....	09
CONCEITOS FUNDAMENTAIS .....	10
Sensibilidade .....	10
Exatidão .....	11
Precisão .....	11
Linearidade .....	11
Estabilidade .....	11
Alcance .....	11
Resolução .....	11
Velocidade de Resposta .....	12
Histereze .....	12
Outros .....	12
EXERCÍCIOS .....	13
 MEDIDA DE PRESSÃO .....	 15
Pressão Absoluta .....	16
Pressão Relativa ou Manométrica .....	16
Pressão Diferencial .....	16
Pressão Negativa ou à Vácuo .....	16
Pressão Estática .....	17
Pressão Dinâmica ou Cinética .....	17
MEDIDORES DE PRESSÃO DE COLUNA LÍQUIDA .....	17
Barômetro de Mercúrio .....	17
Barômetro de Aneróide .....	17
MEDIDORES DE PRESSÃO MECÂNICOS .....	18
Tubos de Bourdon .....	18
Manômetro .....	19

Manômetro Diferencial .....	20
Manômetro Duplo .....	20
Manômetros com Selagem Líquida .....	21
Manômetros com Sensor do Tipo Diafragma .....	21
Manômetros do Tipo Fole .....	23
Outros Tipos de Manômetros .....	23
EXERCÍCIOS .....	24
 MEDIDA DE VAZÃO .....	 27
Vazão Volumétrica .....	27
Vazão Mássica .....	28
Vazão Gravitacional .....	28
PERDA DE CARGA VARIÁVEL (ÁREA CONSTANTE) .....	29
Placa de Orifício .....	29
Tubo de Venturi .....	34
Tubo de Pitot .....	36
Tubo de Dall .....	38
Annubar .....	40
ÁREA VARIÁVEL (PERDA DE CARGA CONSTANTE) .....	41
Rotâmetro .....	41
MEDIDORES DE VOLUME DO FLUIDO PASSANTE .....	42
Rodas Ovais .....	42
MEDIDORES DE VELOCIDADE (PELO IMPACTO DO FLUIDO) .....	43
Turbina .....	43
MEDIDORES ESPECIAIS .....	43
Elétrico-Magnético Indutivo .....	44
EXERCÍCIOS .....	45
 MEDIDA DE NÍVEL .....	 47
MEDIDA DIRETA .....	47
Visores de Nível .....	47
Bóias .....	47
MEDIDA INDIRETA .....	48
Borbulhamento para Recipientes Abertos .....	48
Borbulhamento para Recipientes Fechados .....	49

Caixa de Diafragma .....	49
Corpo Imerso .....	50
MEDIDORES ESPECIAIS .....	51
Capacitância Variável .....	51
EXERCÍCIOS .....	52
MEDIDA DE FORÇA OU MOMENTO .....	53
Efeitos Mecânicos - Tração, Compressão .....	53
Tipos de Sensores - Flexão, Cisalhamento e Compressão .....	54
FORÇA OU MOMENTO? .....	54
FATOR DE GAUGE .....	55
APLICAÇÕES .....	56
MÉTODO DE MEDIÇÃO .....	56
ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO .....	57
Montagem em $\frac{1}{4}$ de Ponte .....	57
Montagem em $\frac{1}{2}$ Ponte .....	58
Montagem em Ponte Completa .....	58
EXERCÍCIOS .....	60
MEDIDA DE POSIÇÃO .....	63
Sensores Indutivos .....	63
Sensores Capacitivos .....	65
Sensores Magnéticos .....	67
LVDT .....	67
RVDT .....	70
Potenciométrico .....	71
Encoder .....	73
Encoders Incrementais .....	74
Encoders Absolutos .....	75
EXERCÍCIOS .....	78
MEDIDA DE TEMPERATURA .....	81
ESCALAS DE TEMPERATURA .....	81
Termistores NTC .....	83
Termistores PTC .....	84

Termopar .....	85
Efeitos Termoelétricos .....	85
Tipos de Termopares .....	87
Compensação de Junta de Referência .....	91
Associação de Termopares .....	92
Associação Simples .....	92
Associação Simples Oposta .....	93
Associação em Paralelo .....	94
EXERCÍCIOS .....	95
 SENSORES DE PRESENÇA .....	 100
Sensores Ópticos .....	100
Sensor Óptico por Retrorreflexão .....	102
Sensor Óptico por Transmissão .....	102
Sensor Óptico por Reflexão Difusa .....	103
Sensor Infravermelho Ativo .....	103
Sensor Infravermelho Passivo .....	104
Janela de Luz .....	104
Sensores de Ultra Som .....	104
EXERCÍCIOS .....	108
 SENSORES ÓPTICOS .....	 110
Fotodiodos .....	110
Foto Acoplador .....	110
LDR .....	111
Foto Transistor .....	113
Foto Tiristor LASCR .....	113
Válvula Ultravioleta .....	113
Célula Fotovoltaica .....	114
EXERCÍCIOS .....	115
 MEDIDA DE VELOCIDADE .....	 116
Tacômetro .....	116
MEDIDA DE ACELERAÇÃO .....	117
Acelerômetro .....	117

## INTRODUÇÃO

Para darmos início ao nosso estudo aos sensores e transdutores vamos abordar a essência da utilização destes componentes dentro de um contexto industrial, comercial e residencial.

A automação pode ser definida como um sistema composto por equipamentos eletrônicos e/ou mecânicos auto-suficiente, ou seja, que controlam seu próprio funcionamento, praticamente sem a intervenção humana. A maioria dos sistemas modernos de automação que facilmente são visualizados em indústrias químicas, automobilísticas, empresas comerciais como supermercados, e muitas outras aplicações. Esses sistemas requerem um complexo controle devido a cíclicas realimentações do sistema o que chamamos de automação em malha fechada (Figura 01). Esses processos automatizados contêm cinco componentes básicos, sendo eles:

- ✓ **Acionamento:** provê o sistema de energia para atingir determinado objetivo. São os casos dos motores elétricos, pistões hidráulicos etc.;
- ✓ **Sensoriamento:** mede o desempenho do sistema de automação ou uma propriedade particular de algum de seus componentes. Exemplos: termopares para medição de temperatura e encoders para medição de velocidade;
- ✓ **Controle:** utiliza a informação dos sensores para regular o acionamento. Por exemplo, para manter o nível de água num reservatório, usamos um controlador de fluxo que abre ou fecha uma válvula, de acordo com o consumo. Mesmo um robô requer um controlador, para acionar o motor elétrico que o movimenta;
- ✓ **Comparador ou elemento de decisão:** compara os valores medidos com valores preestabelecidos e toma a decisão de quando atuar no sistema. Como exemplos, podemos citar os termostatos e os programas de computadores;
- ✓ **Programas:** contêm informações de processo e permitem controlar as interações entre os diversos componentes.

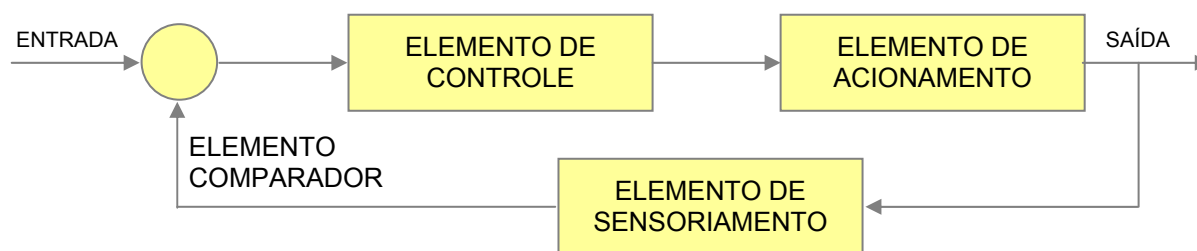


Figura 01 – Automação em Malha Fechada

A utilização de sensores e transdutores nos dias de hoje tornam-se cada vez mais freqüentes em processos de automação seja ele industrial, comercial ou até mesmo residencial. Com o avanço da tecnologia em grande escala novos equipamentos, novos métodos surgem num espaço de tempo cada vez menor, fenômeno este que contribui para o aumento do número de tipos e aplicações desses equipamentos.

## SENSORIAMENTO

O Sensoriamento consiste em uma técnica para obter informações sobre objetos através de dados coletados por instrumentos que não estejam em contato físico ou não com os objetos investigados.

Sensoriamento Remoto pode ser definido como uma medida de trocas de energia que resulta da interação entre a energia contida na Radiação Eletromagnética de determinado comprimento de onda e a contida nos átomos e moléculas do objeto de estudo.

## DEFINIÇÕES FUNDAMENTAIS

Nosso estudo concentra-se justamente na fase de sensoriamento, onde abordaremos os princípios de funcionamento dos instrumentos em função do tipo de grandeza a ser monitorado, como por exemplo, temperatura, pressão, cargas, etc., também serão abordados conceitos quanto às classificações, campo de aplicação e meios de medição.

Comumente costumamos a nos referenciar a esses instrumentos de uma maneira geral como sensores, porém esses podem ser sensores ou transdutores, e em muitas

vezes os termos “sensor e transdutor” são usados indistintamente. Neste caso vamos deixar claro cada um desses conceitos.

- ✓ **SENSOR:** é geralmente definido como um dispositivo que recebe e responde a um estímulo ou um sinal (luminoso, térmico, pressão, etc.). Porém, os sensores artificiais são aqueles que respondem com sinal elétrico a um estímulo ou um sinal.

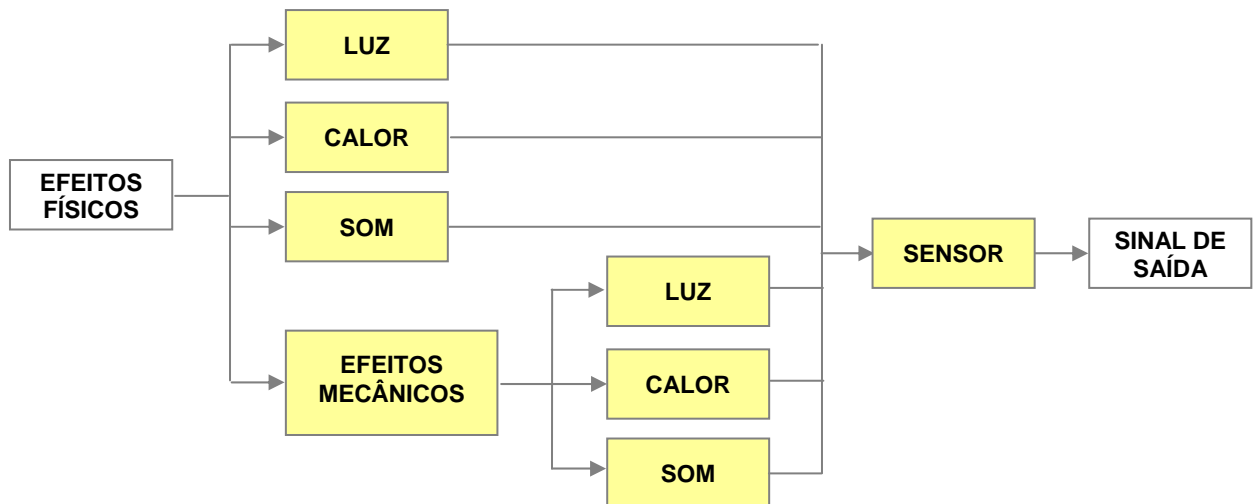


Figura 02 – Atuação de Energias Sobre os Sensores

- ✓ **TRANSDUTOR:** é um dispositivo que converte um tipo de energia em outra não necessariamente em um sinal elétrico. Muitas vezes um transdutor é composto de um sensor e uma parte que converte a energia resultante em um sinal elétrico. Podem ser de indicação direta (como um termômetro de mercúrio ou um medidor elétrico) ou em par com um indicador (algumas vezes indiretamente com um conversor de analógico para digital, um computador e um display) de modo que o valor detectado se torne legível pelo homem. Além de outras aplicações, os sensores são largamente usados na medicina, indústria e robótica.

## SENSORES DISCRETOS

Esses sensores podem assumir apenas dois valores no seu sinal de saída ao longo do tempo, que podem ser interpretados como zero ou um. Não existem naturalmente grandezas físicas que assumam esses valores, mas eles são assim mostrados ao sistema de controle após serem convertidos pelo circuito eletrônico do transdutor, podem também serem chamados de sensores digitais ou binários. É utilizado, por exemplo, em:



- ✓ Chaves de contato;
- ✓ Encoders;
- ✓ Sensores Indutivos;
- ✓ Sensores Capacitivos;
- ✓ Outros.

A saída do dispositivo discreto assume valores “0” ou “1” lógicos. Este tipo de sensor só é capaz de indicar se uma grandeza física atingiu um valor pré-determinado. Abaixo a Figura 03 mostra uma representação gráfica de um sensor binário quando atuado por uma determinada grandeza física.

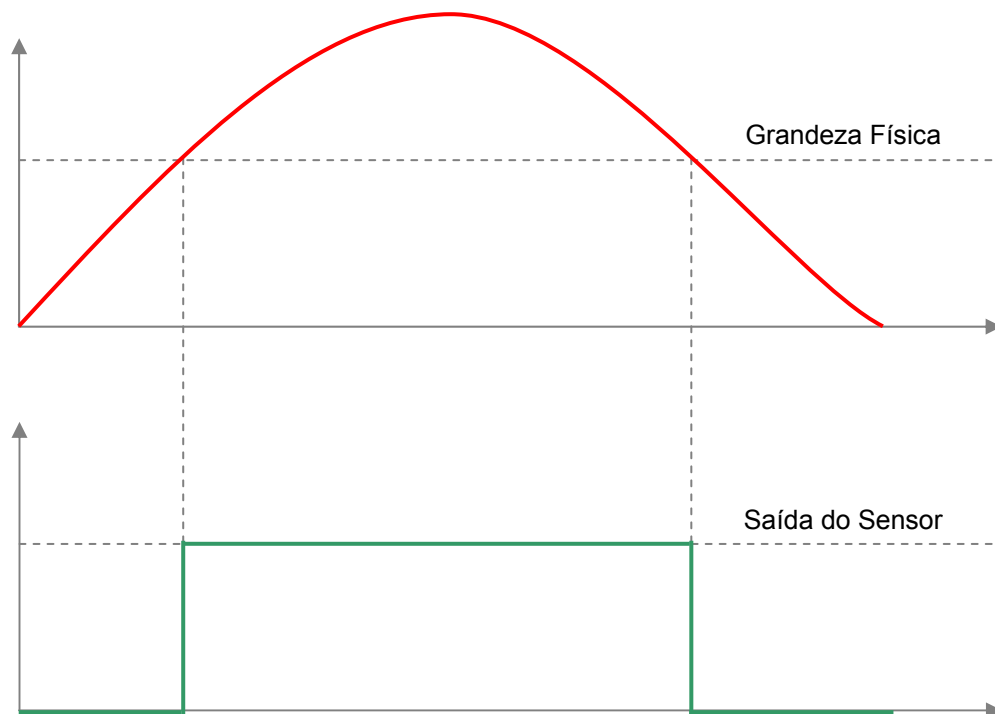


Figura 03 – Resposta de um Sensor Discreto

## SENSORES ABSOLUTOS

Esses sensores podem assumir qualquer valor no seu sinal de saída ao longo do tempo, desde que esteja dentro de sua faixa de operação, algumas grandezas físicas também podem apresentar um comportamento analógico como:

- ✓ Pressão;
- ✓ Temperatura;

- ✓ Carga;
- ✓ Vazão;
- ✓ Outros.

O sensor ou transdutor possui saída contínua, nesse caso a saída destes é quase uma réplica da grandeza física de entrada, estes instrumentos também podem ser chamados de sensores analógicos. Abaixo a Figura 04 mostra uma representação gráfica de um sensor absoluto quando atuado por uma determinada grandeza física.

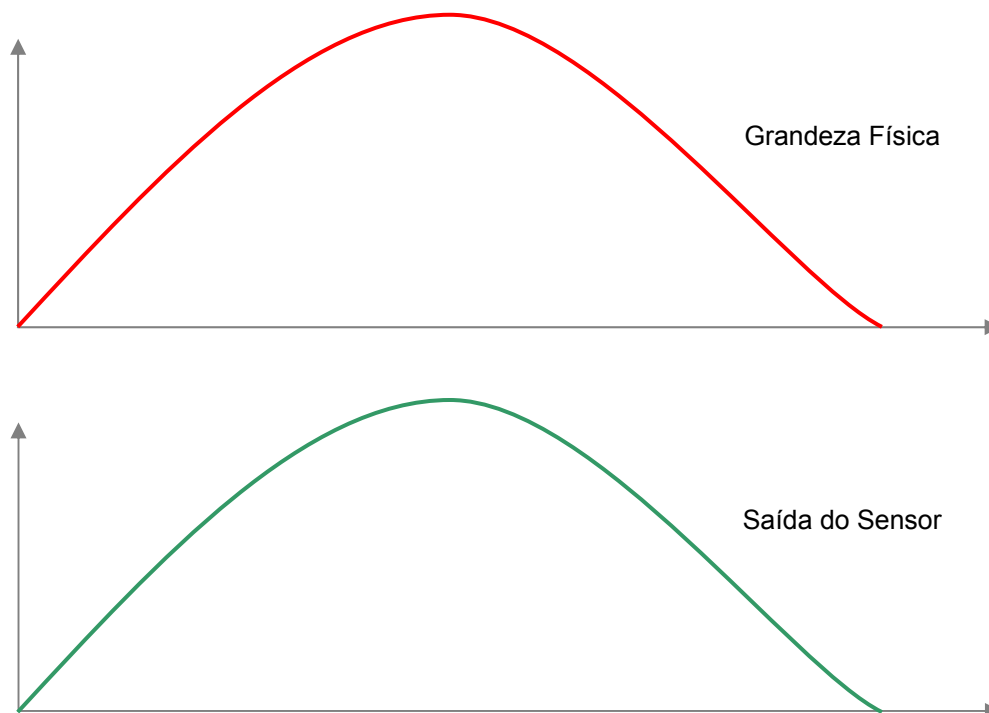


Figura 04 – Resposta de um Sensor Absoluto

## CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Para estudarmos de uma maneira mais detalhada os tipos de sensores e transdutores, campo de aplicação, por exemplo, faz-se necessário a abordagem de alguns conceitos fundamentais que serão necessários para futuros estudos.

**SENSIBILIDADE:** também podendo ser definido como ganho é a razão entre o sinal de saída e de entrada para um dado transdutor. No caso de sensores analógicos, a sensibilidade está ligada à relação entre uma variação na grandeza em questão e a variação na medida fornecida pelo instrumento, ou seja, um sensor muito sensível é

aquele que fornece uma variação na saída para uma pequena variação da grandeza medida.

**EXATIDÃO:** consiste no erro da medida realizada por um transdutor em relação a um medidor padrão.

**PRECISÃO:** é a característica relativa ao grau de repetibilidade do valor por um transdutor. Apesar de as definições serem atualmente padronizadas, existe e principalmente fabricantes que se referem a essa característica como sendo o erro relativo máximo que o dispositivo pode apresentar.

**LINEARIDADE:** Esse conceito se aplica a sensores analógicos. É a curva obtida plotando os valores medidos por um transdutor sob teste contra valores de um padrão. Se o comportamento do transdutor ou sensor for ideal, o gráfico obtido é uma reta. Os gráficos abaixo apresentados mostram um comportamento linear para o da esquerda e não linear para o da direita.

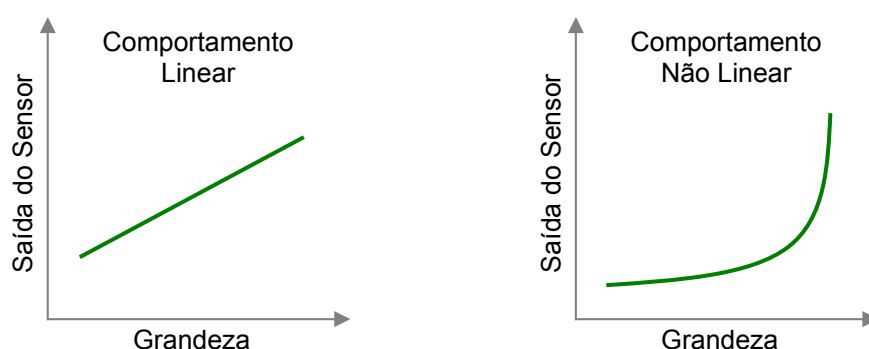


Figura 05 – Representação da Curva de Comportamento de um Sensor

**ESTABILIDADE:** Está relacionada com a flutuação da saída do sensor. Se a flutuação for muito alta, ou seja, se o sensor possuir uma baixa estabilidade, a atuação do controlador que utiliza esse sinal pode ser prejudicada.

**ALCANCE:** Representa toda faixa de valores de entrada de um transdutor.

**RESOLUÇÃO:** Define-se como o menor incremento de entrada o qual gera uma saída perceptível e repetitiva, quantificando-se como porcentagem do fundo de escala.

**VELOCIDADE DE RESPOSTA:** trata-se da velocidade com que a medida fornecida pelo sensor alcança o valor real do processo. Em sistemas realimentados o ideal é que o sensor utilizado tenha uma resposta instantânea, pois uma resposta lenta pode prejudicar muito a eficiência do sistema de controle e até impedir que o sistema funcione o contento.

**HISTERESE:** Refere-se à zona morta obtida sob a diferença entre as curvas de resposta na subida e descida de escala.

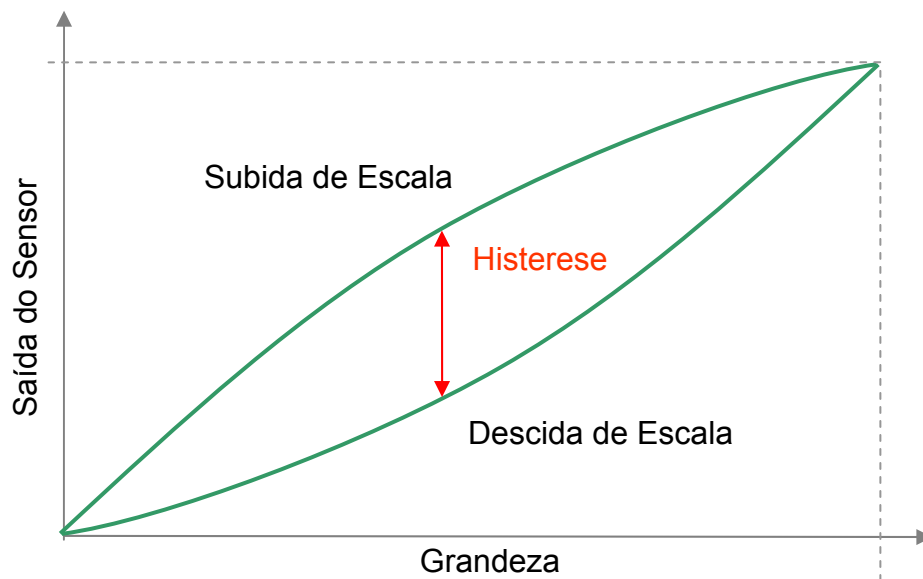


Figura 06 – Gráfico Histerese

**OUTROS:** devem-se levar em consideração na especificação dos sensores as seguintes características: facilidade de manutenção, custo, calibração, dimensões, faixa de trabalho, histerese, vida útil, etc..

**EXERCÍCIOS**

1. Defina automação de sistemas.

---

---

---

---

2. Sensoriamento pode ser definido como:

- a. (   )      A comparação dos valores medidos com valores preestabelecidos e toma a decisão de quando atuar no sistema.
- b. (   )      Utiliza a informação dos sensores para regular o acionamento
- c. (   )      Mede o desempenho do sistema de automação ou uma propriedade particular de algum de seus componentes.
- d. (   )      Nenhuma das alternativas está correta.

3. Diferencie sensores de transdutores. Cite exemplos.

---

---

---

---

4. Diferencie sensores discretos de sensores absolutos. Cite exemplos.

---

---

---

---

## 5. Relacione os conceitos fundamentais.

- a. Exatidão ( ) Representa toda faixa de valores de entrada de um transdutor.
- b. Sensibilidade ( ) Característica relativa ao grau de repetibilidade do valor por um transdutor.
- c. Linearidade ( ) Está relacionada com a flutuação da saída do sensor.
- d. Precisão ( ) Razão entre o sinal de saída e de entrada para um dado transdutor.
- e. Alcance ( ) Refere-se à zona morta obtida sob a diferença entre as curvas de resposta na subida e descida de escala.
- f. Estabilidade ( ) Erro da medida realizada por um transdutor em relação a um medidor padrão.
- g. Velocidade de Resposta ( ) Curva obtida plotando os valores medidos por um transdutor sob teste contra valores de um padrão.
- h. Histerese ( ) Define-se como o menor incremento de entrada o qual gera uma saída perceptível e repetitiva, quantificando-se como porcentagem do fundo de escala.
- i. Resolução ( ) Trata-se da velocidade com que a medida fornecida pelo sensor alcança o valor real do processo.

## 6. Esboce o diagrama de blocos de um sistema automatizado em malha fechada.

## MEDIDA DE PRESSÃO

Conceitua-se pressão geralmente como sendo a força normal por unidade de área e costuma ser representada por uma série de unidades, como por exemplo: PSI (libras/polegadas quadrada), bar, atmosfera, Pascal, etc. No sistema internacional de unidades - SI, desde 11 de outubro de 1960, a pressão passou a ser definida em termos de Newton por metro quadrado, também conhecido como Pascal. Nem todos os países participam dessa conferência de internacionalização do sistema de medidas, e mesmo alguns dos que participaram ainda mantêm o uso de seus sistemas tradicionais, como é o caso dos Estados Unidos e Inglaterra. Em nosso curso sempre utilizaremos o sistema internacional como base para os estudos.

Segundo o SI – sistema internacional de medidas o conceito de pressão pode ser definido pela relação matemática:

$$P = \frac{F}{A} \quad (\text{Equação 01})$$

Onde:

F = força em [N]

A = área em [m<sup>2</sup>]

P = pressão [N/m<sup>2</sup> = Pa]

Ou ainda a pressão hidrostática, definido pela relação matemática:

$$P = \rho \cdot g \cdot h \quad (\text{Equação 02})$$

Onde:

$\rho$  = massa específica [kg/m<sup>3</sup>]

g = aceleração da gravidade [m/s<sup>2</sup>]

h = altura da coluna de fluido [m]

P = pressão [N/m<sup>2</sup> = Pa]

A pressão pode ser medida em termos absoluto ou diferencial, desta forma é comum identificar três tipos de pressão:

- ✓ Pressão absoluta;
- ✓ Pressão relativa ou manométrica;
- ✓ Pressão diferencial.

**PRESSÃO ABSOLUTA:** A pressão absoluta é a diferença entre a pressão em um ponto particular num fluido e a pressão absoluta (zero), isto é, vácuo completo. Um barômetro é um exemplo de sensor de pressão absoluta porque a altura da coluna de mercúrio mede a diferença entre a pressão atmosférica local e a pressão "zero" do vácuo que existe acima da coluna de mercúrio.

**PRESSÃO RELATIVA OU MANOMÉTRICA:** Quando o elemento mede a diferença entre a pressão desconhecida e a pressão atmosférica local, esta pressão é conhecida como pressão manométrica, ou pressão relativa.

**PRESSÃO DIFERENCIAL:** Quando o sensor mede a diferença entre duas pressões desconhecidas, sendo nenhuma delas a pressão atmosférica, então esta pressão é conhecida como "diferencial".

É de grande importância, ao exprimir um valor de pressão, determinar se ela é absoluta, relativa ou diferencial.

Além das pressões já citadas estas também podem ser caracterizadas como pressões:

Pressão negativa ou vácuo;  
Pressão estática;  
Pressão dinâmica ou cinética.

**PRESSÃO NEGATIVA OU VÁVUO:** É quando o sistema tem a pressão relativa menor que a pressão atmosférica.



**PRESSÃO ESTÁTICA:** É a pressão exercida por um líquido em repouso ou que esteja fluindo perpendicularmente à tomada de impulso, por unidade de área exercida.

**PRESSÃO DINÂMICA OU CINÉTICA:** É a pressão exercida por um fluido em movimento. É a medida fazendo a tomada de tal forma que recebe o impacto do fluido.

## MEDIDORES DE PRESSÃO DE COLUNA LÍQUIDA

Para a medição de pressão atmosférica, os dois instrumentos mais usados são o barômetro de mercúrio e o barômetro de aneróide.

**BARÔMETRO DE MERCÚRIO:** O barômetro de mercúrio foi inventado em 1643 por Evangelista Torricelli, e funciona porque o ar tem peso. Torricelli observou que se a abertura de um tubo de vidro fosse cheia com mercúrio, a pressão atmosférica iria afetar o peso da coluna de mercúrio no tubo. Quanto maior a pressão do ar, mais comprida fica a coluna de mercúrio. Assim, a pressão pode ser calculada, multiplicando-se o peso da coluna de mercúrio pela densidade do mercúrio e pela aceleração da gravidade. Ao nível do mar, a pressão atmosférica é equivalente a 101,3 quilo pascal ( $10^3$ ) Pa. O mercúrio é ideal para o barômetro líquido, pois sua alta densidade permite uma pequena coluna. Num barômetro de água, por exemplo, seria necessária uma coluna de 10 metros e, ainda assim, haveria um erro de 2%.

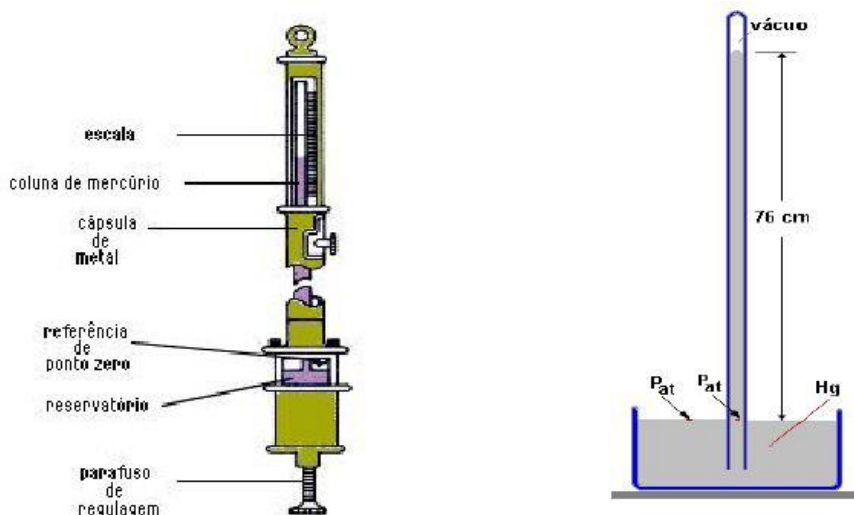


Figura 07 – Barômetro de Torricelli

**BARÔMETRO ANERÓIDE:** A maioria dos barômetros é aneróide (funcionam sem líquido). Eles consistem em uma pequena caixa de metal, fechada a vácuo. Um lado é

fixo e o outro é ligado a uma forte mola que evita que a caixa se abra. O lado móvel se expande se a pressão do ar diminui e se comprime se a pressão do ar aumenta. A posição do lado móvel é indicada por um ponteiro.

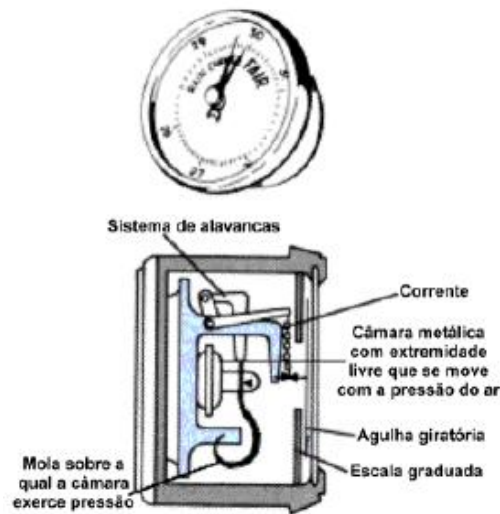


Figura 08 – Barômetro de Aneróide

## MEDIDORES DE PRESSÃO MECÂNICOS

Medidores de pressão mecânicos utilizam a deformação de um elemento elástico para indicar o valor da pressão aplicada sobre ele. Estes medidores podem ser divididos em três categorias.

- ✓ Tubos de Bourdon;
- ✓ Diafragmas metálicos;
- ✓ Foles.

**TUBO DE BOURDON:** A maioria dos medidores de pressão usada industrialmente emprega um tubo de Bourdon. O tubo de Bourdon é formado por um tubo oval que tende a ficar circular com a aplicação de uma pressão interna.

O tubo de Bourdon pode ser curvado em várias formas constituindo o elemento sensor de diversos medidores.

Existem configurações na forma de C, helicoidal, espiral e torcida. O medidor de tubo helicoidal que possui a uma vantagem principal sobre a configuração C, ele pode indicar o maior movimento sem o uso de engrenagens.

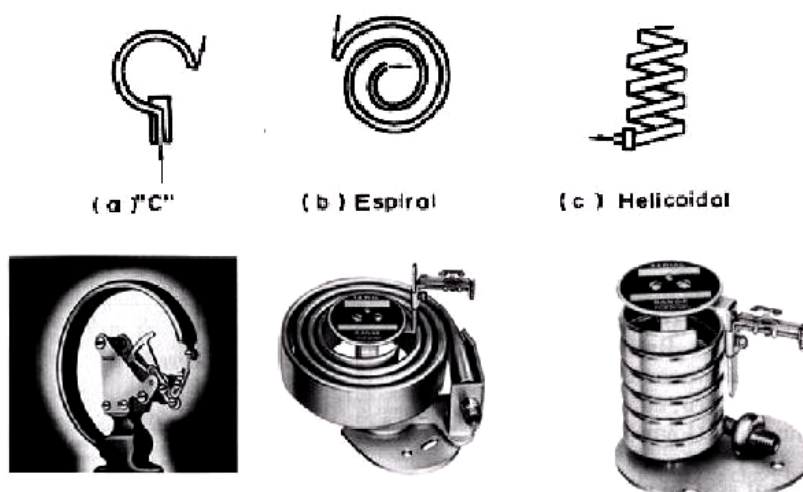


Figura 08 – Tubos de Bourdon

**MANÔMETRO:** é instrumento destinado a medir pressão (absoluta, relativa ou diferencial) composta em sua maioria de três partes básicas, sendo elas, o elemento elástico responsável em sofrer a ação da variação de pressão, por exemplo, os tubos de Bourdon, um elemento apresentador de dados, ou seja, uma escala e um mecanismo responsável em receber a variação do elemento elástico e atuar o elemento apresentador de dados.

Na figura 09 abaixo mostra um manômetro com um tubo de Bourdon. Uma das extremidades (inferior) é selada presa a um quadrante pivotado. A outra extremidade (superior) está conectada a um sistema dentado que por sua vez está conectado aos dentes de uma engrenagem que movimenta o ponteiro, ou seja, a deformação produzida. No tubo é amplificada mecanicamente e transformada em movimento angular de um ponteiro associado a uma escala previamente calibrada.

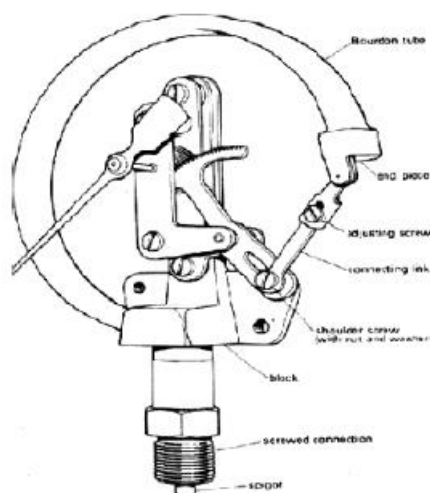


Figura 09 – Parte Interna de um Manômetro com Tubo de Bourdon

**MANÔMETRO DIFERENCIAL:** este tipo construtivo é adequado para medir a diferença de pressão entre dois pontos quaisquer do processo. É composto de dois tubos de Bourdon dispostos em oposição e interligados por articulações mecânicas e dotado de dois pontos de tomada de pressão, porém não mede qual é a pressão nesses pontos e sim a diferença de pressão entre os pontos.

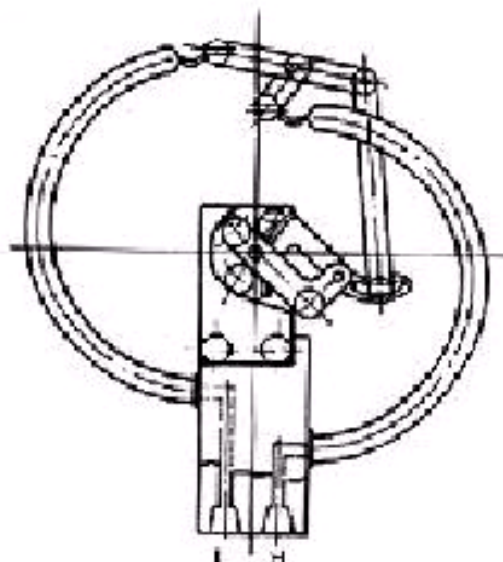


Figura 10 – Parte Interna de um Manômetro Diferencial

**MANÔMETRO DUPLO:** é um manômetro com dois Bourdon e mecanismos independentes e utilizados para medir duas pressões distintas, porém com mesma faixa de trabalho. A vantagem deste tipo está no fato de se utilizar uma única caixa e um único mostrador.

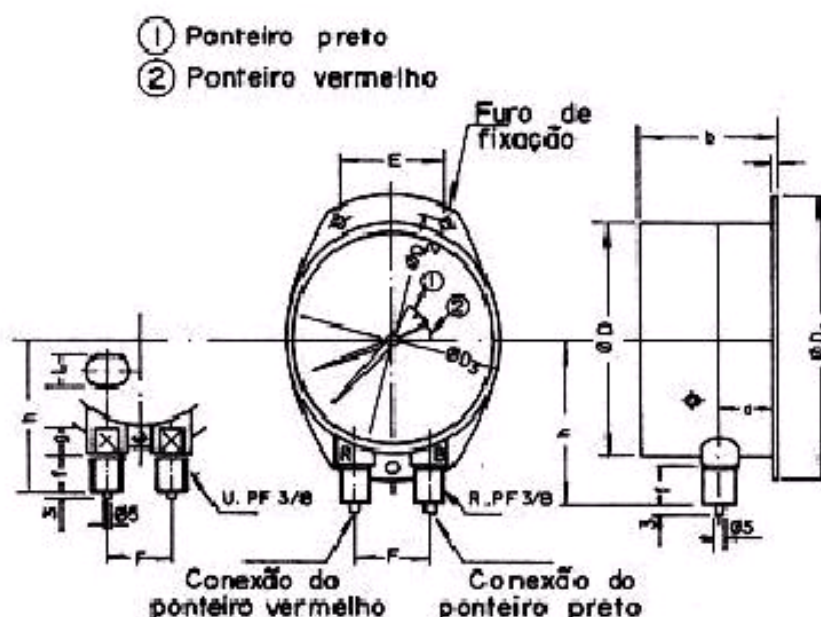
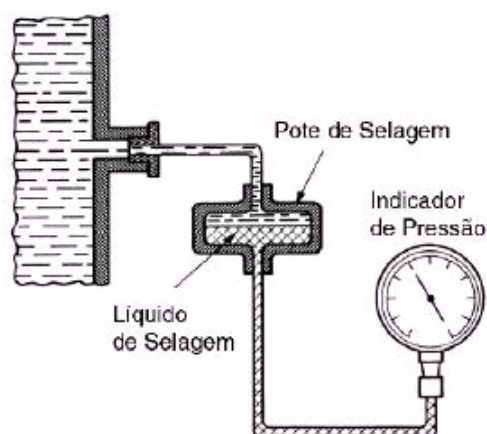


Figura 11 – Manômetro Duplo

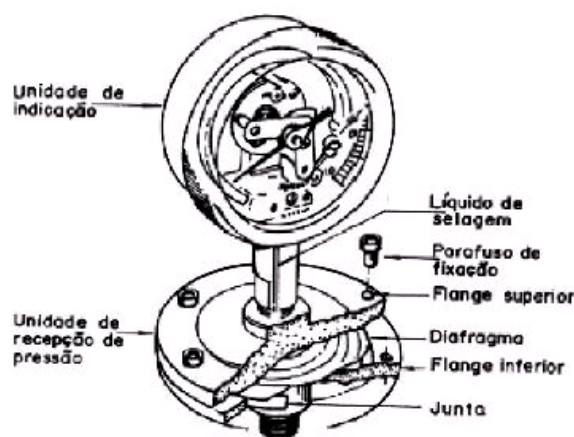
**MANÔMETROS COM SELAGEM LÍQUIDA:** em processos industriais que manipulam fluidos corrosivos, viscosos, tóxicos, sujeitos à alta temperatura e/ou radioativos, a medição de pressão com manômetro tipo elástico se torna impraticável pois o Bourdon não é adequado para essa aplicação, seja em função dos efeitos da deformação proveniente da temperatura, seja pela dificuldade de escoamento de fluidos viscosos ou seja pelo ataque químico de fluidos corrosivos.

Nesse caso, a solução é recorrer a utilização de algum tipo de isolamento para impedir o contato direto do fluido do processo com o Bourdon. Existem Basicamente dois tipos de selagem utilizada, sendo elas:

- ✓ Isolação com selagem líquida: utiliza um fluido inerte em contato com o bourdon e que não se mistura com o fluido do processo;
- ✓ Isolação com selagem líquida e diafragma como selo: O fluido de selagem mais utilizado nesse caso é a glicerina, por ser inerte a quase todos os fluidos. Este método é o mais utilizado e já é fornecido pelos fabricantes quando solicitados.



Isolação com selagem líquida



Isolação com selagem líquida e diafragma como selo

Figura 12 – Manômetros de Selagem Líquida

**MANÔMETROS COM SENSOR DO TIPO DIAFRAGMA:** o manômetro com sensor do tipo diafragma é um disco circular utilizado para medir pressões geralmente de pequena amplitude.

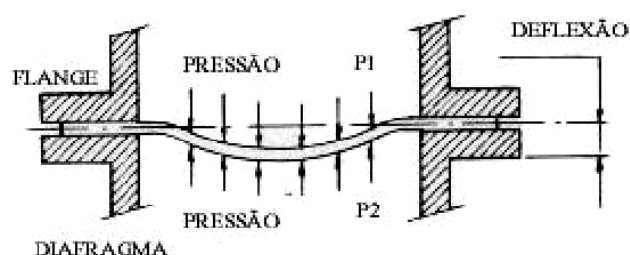


Figura 13 – Detalhe do Funcionamento do Diafragma

O manômetro com sensor do tipo diafragma é composto por uma membrana fina de material elástico, metálico ou não. Neste manômetro, uma membrana fica sempre oposta a uma mola. Ao aplicar-se uma pressão no diafragma haverá um deslocamento do mesmo até o ponto onde a força da mola se equilibrará com a força elástica do diafragma. Este deslocamento resultante é transmitido a um sistema de indicação (ponteiro) que mostra a medição efetuada.

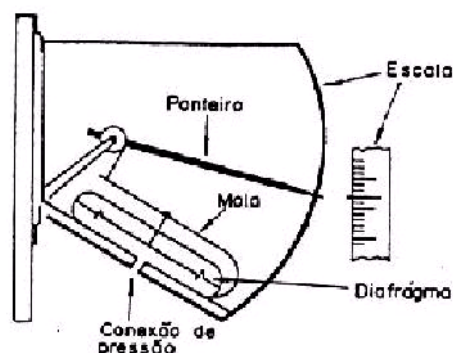


Figura 14 – Funcionamento do Manômetro com Diafragma

Os diafragmas metálicos são usados para medição de pressão relativamente baixas. O diafragma pode ser plano (disco circular) ou pode ser corrugado. Os diafragmas mais corrugados são geralmente usados em diâmetros maiores produzindo assim uma maior deflexão linear para baixa pressão. Entretanto com maiores dimensões e baixa pressão, a resposta dinâmica é pobre e o diafragma corrugado então é usado para medidas de pressão estáticas.

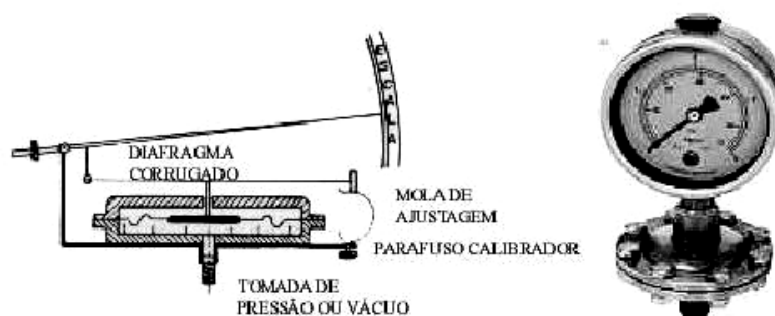


Figura 15 – Manômetro com Diafragma Corrugado



**MANÔMETROS DO TIPO FOLE:** Sensores do tipo diafragma (ou membrana) ou fole representam tipos similares de deformação elástica. Fole é um dispositivo que possui ruga no círculo exterior que tem a possibilidade de expandir-se e contrair-se em função de pressões aplicadas no sentido do eixo. Como a resistência à pressão é limitada, é usado para baixa pressão.

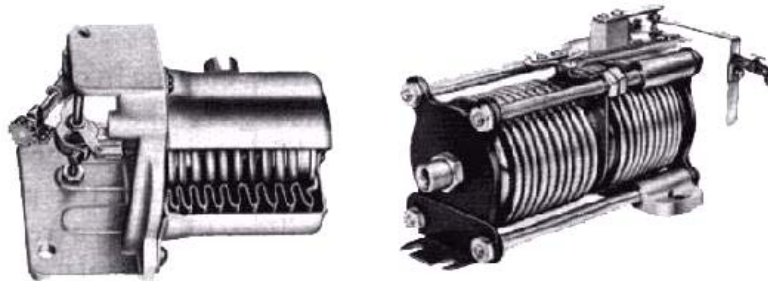


Figura 16 – Manômetro do Tipo Fole

## OUTROS TIPOS DE MANÔMETROS

Ainda existem outros tipos de manômetros que se utilizam de outros elementos sensores para a identificação de pressão, como exemplo, Strain Gauges, porém neste momento não iremos abordar devido a falta desses conceitos fundamentais. O conceito de pressão será novamente abordado de acordo com a abordagem de novos sensores no qual a medida de pressão é aplicável.

## EXERCÍCIOS

1. Diferencie pressões manométrica, absoluta e diferencial.

---

---

---

---

2. Diferencie pressão estática de pressão dinâmica.

---

---

---

---

3. Relacione os conceitos de medição de pressão.

- |                                    |     |   |
|------------------------------------|-----|---|
| a. Pressão Absoluta                | ( ) | É a diferença entre duas pressões desconhecidas, sendo nenhuma delas a pressão atmosférica.               |
| b. Pressão Relativa ou Manométrica | ( ) | É a diferença entre a pressão em um ponto particular num fluido e a pressão zero, isto é, vácuo completo. |
| c. Pressão Diferencial             | ( ) | Quando o elemento mede a diferença entre a pressão desconhecida e a pressão atmosférica local.            |

4. A pressão exercida por um líquido em repouso ou que esteja fluindo perpendicularmente à tomada de impulso, por unidade de área exercida é denominada como.

- a. ( ) Pressão Estática
- b. ( ) Pressão Dinâmica
- c. ( ) Pressão Diferencial
- d. ( ) Pressão Absoluta

5. Em processos industriais que manipulam fluidos corrosivos, viscosos, tóxicos, sujeitos à alta temperatura e/ou radioativos, a medição de pressão com manômetro tipo elástico se torna impraticável, pois o Bourdon não é adequado para essa aplicação, seja em



função dos efeitos da deformação proveniente da temperatura, seja pela dificuldade de escoamento de fluidos viscosos, ou seja, pelo ataque químico de fluidos corrosivos. Mediante a tais problemas qual seria o instrumento adequado?

- a. ( ) Manômetro de Selagem Líquida
- b. ( ) Manômetro Diferencial
- c. ( ) Manômetro Duplo
- d. ( ) Nenhuma das Alternativas

6. Aplica-se uma força de 80 N perpendicularmente a uma superfície de área  $0,8 \text{ m}^2$ . Calcule a pressão exercida.

7. Qual a pressão exercida por um tanque de água que pesa 1000 N, sobre a sua base que tem um diâmetro de 2m?

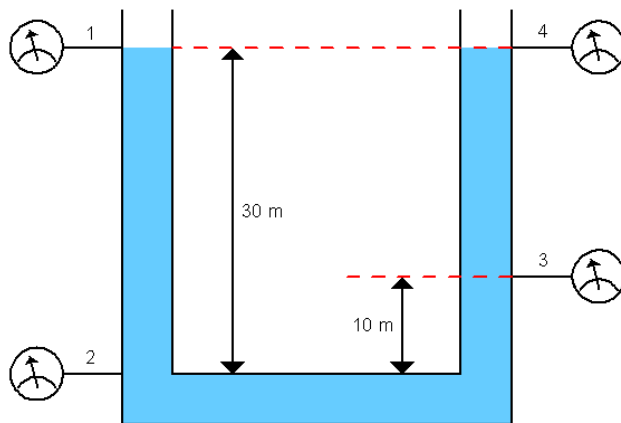
8. Água contida num tanque exerce uma pressão de  $40 \text{ N/m}^2$  sobre a sua base. Se a base tem uma área de  $10 \text{ m}^2$ , calcule a força exercida pela água sobre a base.

9. Um reservatório contém água até uma altura de 8 m. Determine a pressão hidrostática no fundo do reservatório. Dados:  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ , massa específica da água  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ .

10. Calcule a pressão total no fundo de um lago à profundidade de 20 m. São dados: pressão atmosférica  $P_{\text{atm}} = 10^5 \text{ N/m}^2$ ; aceleração da gravidade  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$  e; massa específica da água  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ .

11. Calcule a pressão total no fundo de um rio a 10 m de profundidade. São dados:  $P_{\text{atm}} = 10^5 \text{ N/m}^2$ ;  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$  e; massa específica da água  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

12. No sistema abaixo temos quatro pontos de tomada de pressão, o tanque está aberto e preenchido com água  $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$ . Calcule a pressão nos pontos indicados sabendo que a pressão atmosférica  $P_{\text{atm}} = 10^5 \text{ N/m}^2$ ; aceleração da gravidade  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$



## MEDIDA DE VAZÃO

Na maioria das operações realizadas nos processos industriais é muito importante efetuar a medição e o controle da quantidade de fluxo de líquidos, gases e até sólidos granulados, não só para fins contábeis, como também para a verificação do rendimento do processo. Assim, estão disponíveis no mercado diversas tecnologias de medição de vazão cada uma tendo sua aplicação mais adequada conforme as condições impostas pelo processo. Neste capítulo abordaremos algumas destas tecnologias, suas aplicações, e os princípios físicos envolvidos, bem como os testes, calibração e suas interligações elétricas em forma de malhas de medição, registro, indicação e controle.

Vazão pode ser definida como sendo a quantidade volumétrica, mássica ou gravitacional de um fluido que passa através de uma seção de uma tubulação ou canal por unidade de tempo.

**OBSERVAÇÃO:** A vazão também pode ser obtida pelo resultado da multiplicação da área seccional pela média da velocidade do fluido.

**VAZÃO VOLUMÉTRICA:** é definida como sendo a quantidade em volume que escoar através de certa seção em um intervalo de tempo considerado. É representado pela letra  $Q$  e expressa pela seguinte equação:

$$Q = Q_v = \frac{V}{t} \quad (\text{Equação 03})$$

Onde:

$Q$  = vazão em  $[m^3/s]$

$V$  = volume em  $[m^3]$

$t$  = tempo  $[s]$

As unidades de vazão volumétricas mais utilizadas são:  $m^3/s$ ,  $m^3/h$ ,  $l/h$ ,  $l/min$  GPM,  $Nm^3/h$  e SCFH.

**VAZÃO MÁSSICA:** é definida como sendo a quantidade em massa de um fluido que atravessa a seção de uma tubulação por unidade de tempo. É representada pela letra  $Q_m$  e expressa pela seguinte equação:

$$Q_m = \frac{m}{t} \quad (\text{Equação 04})$$

Onde:

$Q_m$  = vazão mássica em [kg/s]

$m$  = massa em [kg]

$t$  = tempo [s]

**RELAÇÃO ENTRE UNIDADES:** A relação entre as unidades de medição de vazão volumétrica e mássica pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$Q_m = \rho \cdot Q_v \quad (\text{Equação 05})$$

Onde:

$\rho$  = massa específica em [kg/m<sup>3</sup>]

As unidades de vazão mássica mais utilizadas são: kg/s, kg/h, T/h e Lb/h.

**VAZÃO GRAVITACIONAL:** é a quantidade em peso que passa por uma certa seção por unidade de tempo. É representada pela letra  $Q_\rho$  e expressa pela seguinte equação:

$$Q_\rho = \frac{W}{t} \quad (\text{Equação 06})$$

Onde:

$Q_\rho$  = vazão gravitacional [kgf/h]

$W$  = peso em [kgf]

$t$  = tempo [h]

As unidades de vazão gravitacional mais utilizadas são: kgf/h e lbf/h.

Iremos abordar os principais medidores de vazão, sendo que, os elementos primários de vazão podem ser classificados de acordo com a seguinte divisão:

- ✓ **PERDA DE CARGA VARIÁVEL (ÁREA CONSTANTE):** Orifício Calibrado, Tubo de Venturi, Bocal, Tubo de Pilot;
- ✓ **ÁREA VARIÁVEL (PERDA DE CARGA CONSTANTE):** Rotâmetro, Área-meter;
- ✓ **MEDIDORES DE VOLUME DO FLUIDO PASSANTE:** Disco nutante, Pistão flutuante, Rodas ovais;
- ✓ **MEDIDORES DE VELOCIDADE (PELO IMPACTO DO FLUIDO):** Tipo hélice, Tipo turbina, Target-meter;
- ✓ **MEDIDORES ESPECIAIS:** Eletro-magnético, Ultra-sônico, Fio quente.

### PERDA DE CARGA VARIÁVEL (ÁREA CONSTANTE)

Vamos abordar alguns dos instrumentos medidores de vazão mais comumente utilizados no qual o conceito básico para se extrair a medida de vazão é através da perda de carga, ou seja, a diferença de pressão.

**PLACA DE ORIFÍCIO:** o orifício calibrado é o mais simples e flexível dos elementos primários de vazão. Consiste de um disco chato, de pouca espessura, com um orifício para passagem do fluido, que é colocado por meio de flanges na tubulação como indica abaixo.

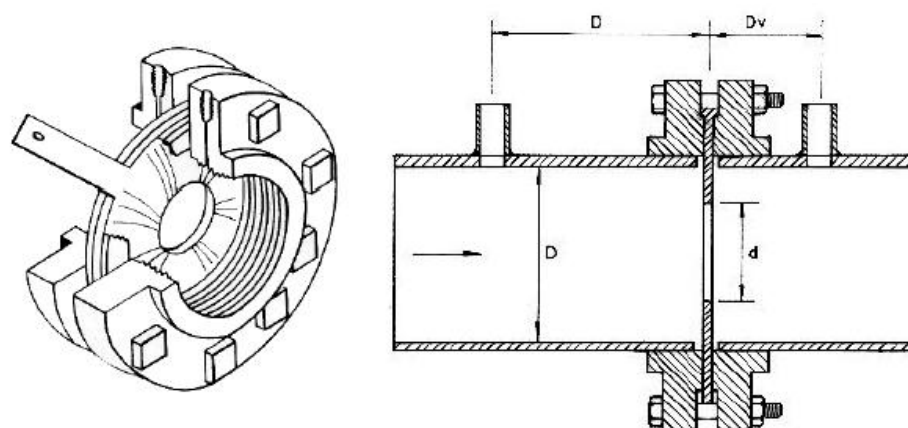


Figura 17 – Placa de Orifício

Como pode ser visto na figura anterior, no orifício a seção transversal do fluido se contrai e a velocidade aumenta. Pelo teorema de Bernoulli nós sabemos que a pressão estática diminui à medida que a velocidade do fluido aumenta. A pressão estática em dois pontos diferentes da canalização pode ser medida por um instrumento de pressão diferencial e desde que esta diferença de pressão é uma função da vazão, o orifício pode ser calibrado convenientemente, tornando-se um elemento primário de vazão. Vamos deduzir a seguir a fórmula que nos dá a vazão em função da diferença manométrica pelo teorema de Bernoulli:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2$$

**Dividindo por  $\rho g$ .**

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} \Rightarrow \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} = \frac{P_1 - P_2}{\rho g}$$

**Mas  $P = \rho \cdot g \cdot h$**

$$\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} = \frac{\rho g h_1 - \rho g h_2}{\rho g} \Rightarrow \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} = h_1 - h_2$$

**Fazendo  $h_1 - h_2$  remos:**

$$V_2^2 - V_1^2 = 2g\Delta h$$

**Mas  $Q = A \cdot V$ , portanto:**

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \therefore V_1 = \frac{A_2}{A_1} V_2 \Rightarrow V_2^2 - \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^2 V_2^2 = 2g\Delta h \therefore V_2^2 - \left[ 1 - \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right] = 2g\Delta h$$

$$V_2 = \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \therefore V_2 = \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1 - \left(\frac{\frac{\pi D_2^2}{4}}{\frac{\pi D_1^2}{4}}\right)^2}} \therefore V_2 = \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1 - \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4}}$$

A equação (Equação 07) abaixo não calcula a vazão mas a velocidade média de escoamento do fluido.

$$V_2 = \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1 - \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4}} \quad (\text{Equação 07})$$

Onde:

$V_2$  = velocidade de escoamento do fluido no ponto 2 em [m/s]

$g$  = aceleração da gravidade em [m/s<sup>2</sup>]

$\Delta h$  = diferença da pressão anotada no tubo “U” em [m]

$D_2$  = diâmetro do orifício calibrado em [m]

$D_1$  = diâmetro da tubulação em [m]

A vazão neste tipo de sistema pode ser obtida multiplicando a velocidade de escoamento pela área da secção transversal no mesmo ponto.

$$Q = V_2 A_2 \quad (\text{Equação 08})$$

Onde:

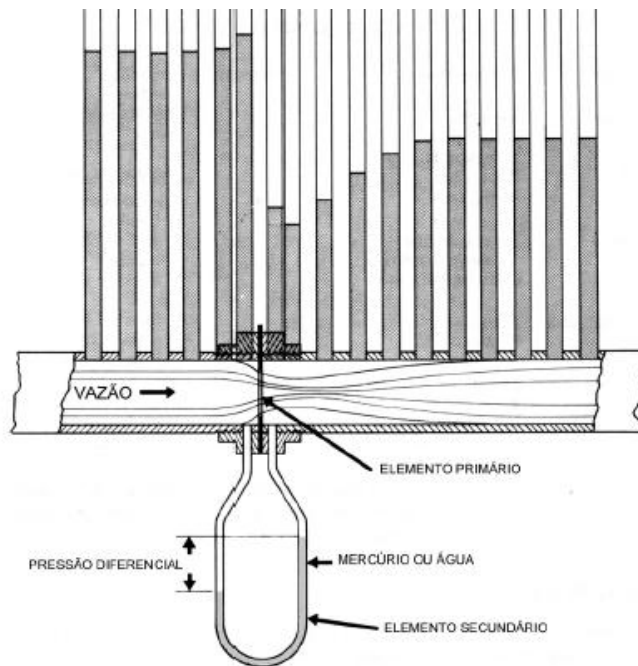
$Q$  = vazão em [m<sup>3</sup>/s]

$V_2$  = velocidade de escoamento do fluido no ponto 2 em [m/s]

$A_2$  = área da secção transversal no ponto 2 em [m<sup>2</sup>]

**EXEMPLO:** A figura abaixo mostra o diagrama de pressão sobre um sistema no qual a vazão é medida com o auxílio de uma placa de orifício. Nota-se que a placa de orifício proporciona ao sistema uma grande diferença de pressão entre montante e jusante o que dá a possibilidade de medir a vazão em função da pressão diferencial que é anotada no tubo em “U”. Com base na equação da velocidade de escoamento de um fluido deduzida

a partir da equação de Bernoulli, vamos calcular a vazão do sistema ao lado tendo as seguintes informações:



- ✓ Ø Tubulação = 80 mm.
- ✓ Ø do orifício calibrado = 20 mm.
- ✓ Pressão diferencial anotada no tudo em "U" ( $\Delta h$ ) = 10 mm.
- ✓ Aceleração da gravidade  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

Figura 18 – Variação da Pressão nas Paredes da Tubulação

## RESOLUÇÃO

1. Encontrar a velocidade de escoamento do fluido no orifício calibrado.

$$V_2 = \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1 - \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4}} \Rightarrow V_2 = \sqrt{\frac{2 \times 9,8 \times 10,01}{1 - \left(\frac{0,02}{0,08}\right)^4}} \Rightarrow V_2 = \sqrt{\frac{0,1962}{0,9961}} \Rightarrow V_2 = 0,4438 [\text{m/s}]$$

2. Encontrar a área da secção transversal do orifício calibrado.

$$A_2 = \frac{\pi D_2^2}{4} \Rightarrow A_2 = \frac{\pi \times 0,02^2}{4} \Rightarrow A_2 = 0,0003 [\text{m}^2]$$

2. Encontrar a vazão multiplicando a velocidade de escoamento do fluido pela área da secção transversal.

$$Q = V_2 \times A_2 \Rightarrow Q = 0,4438 \times 0,0003 \Rightarrow Q = 0,00013 [\text{m}^3/\text{s}]$$



Outra forma de calcularmos a vazão utilizando placa de orifício é através da seguinte equação, porém trata-se de uma equação aproximada, a vazão real depende de efeitos de velocidade, da razão das áreas  $A_1/A_2$  e da condição da superfície do tubo:

$$Q = C.A\sqrt{\frac{2.g}{d} \cdot (P_M - P_J)} \quad (\text{Equação 09})$$

Onde:

Q: vazão ( $\text{m}^3$ )

C: coeficiente de descarga (aprox. 0,63 para a água se o diâmetro do orifício for ao menos metade do diâmetro do tubo)

A: área do orifício ( $\text{m}^2$ )

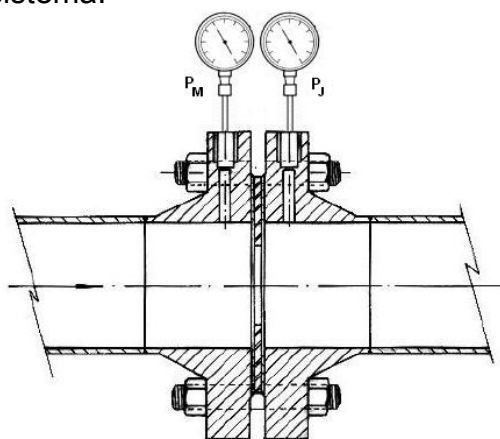
d: densidade do fluido ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$P_M - P_J$ : diferença de pressões (Pa)

g: aceleração da gravidade ( $9.81\text{m}/\text{s}^2$ )

Nesse método extraímos a vazão basicamente através da pressão diferencial anotada em manômetros, podendo ser do tipo simples ou diferencial, sendo o segundo tipo o ideal. Outro ponto extremamente importante é conhecer o tipo de fluido a ser monitorado para que identificar os valores corretos de densidade e coeficiente de descarga.

**EXEMPLO:** A figura abaixo mostra o monitoramento feito com o auxílio de dois manômetros, sendo que um é responsável em medir a pressão na montante e o outro na jusante. Com base nos dados referenciados abaixo vamos determinar a vazão do sistema.



- ✓  $P_M = 30 \text{ Pa}$  e  $P_J = 20 \text{ Pa}$ .
- ✓ Água como fluido corrente.
- ✓  $\varnothing$  do orifício = 30 mm.
- ✓ Aceleração da gravidade  $9,81 \text{ m}/\text{s}^2$ .

Figura 19 – Monitoramento com Manômetros

## RESOLUÇÃO

1. Substituindo os valores na “Equação 09” temos:

$$Q = C.A.\sqrt{\frac{2.g}{d} \cdot (P_M - P_J)} \Rightarrow Q = 0,63 \times \frac{\pi \times 0,03^2}{4} \sqrt{\frac{2 \times 9,81}{1} \cdot (30 - 20)}$$

$$Q = 0,63 \times 7,07 \times 10^{-4} \times 14 \Rightarrow Q = 0,0062 [m^3/s]$$

**TUBO DE VENTURI:** A lei de VENTURI, como é chamada o princípio, foi formulada em 1797, como resultado das investigações de GIOVANNI BATISTA VENTURI, sobre problemas de hidráulica. Tem ela o seguinte enunciado:

*“Os fluidos sob pressão, na passagem através de tubos convergentes; ganham velocidade e perdem pressão, ocorrendo o oposto em tubos divergentes”.*

O tubo VENTURI combina dentro de uma unidade simples uma curta “garganta” estreitada entre duas seções cônicas e está usualmente instalada entre duas flanges, numa tubulação eu propósito é acelerar o fluido e temporariamente baixar sua pressão estática. São fornecidas conexões apropriadas de pressão para observar a diferença nas pressões entre a entrada e a porta estreitada ou garganta.

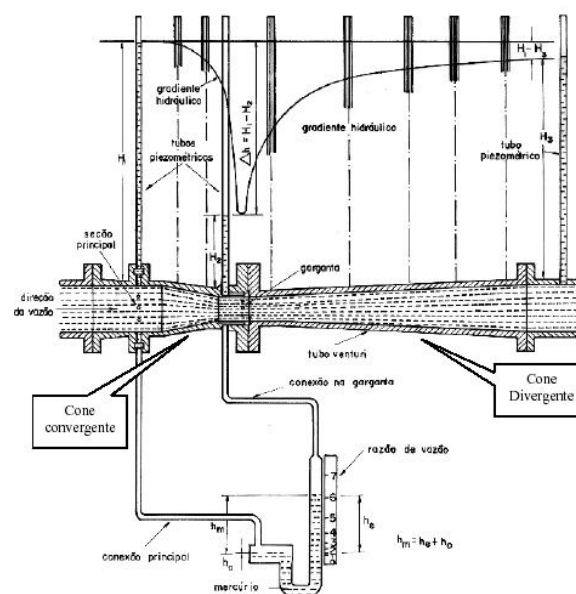


Figura 20 – Configuração de um Tubo de Venturi.

Os dois tipos mais utilizados de tubo Venturi são:

- ✓ Clássico Longo;
- ✓ Clássico Curto;

**CLÁSSICO LONGO:** o difusor aumenta progressivamente até igualar-se ao diâmetro da tubulação:

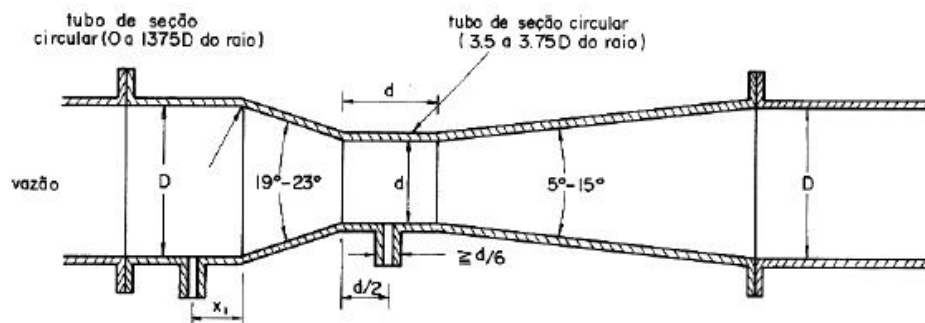


Figura 21 – Tubo de Venturi com Difusor Longo.

**CLÁSSICO CURTO:** o tipo curto tem o difusor truncado.

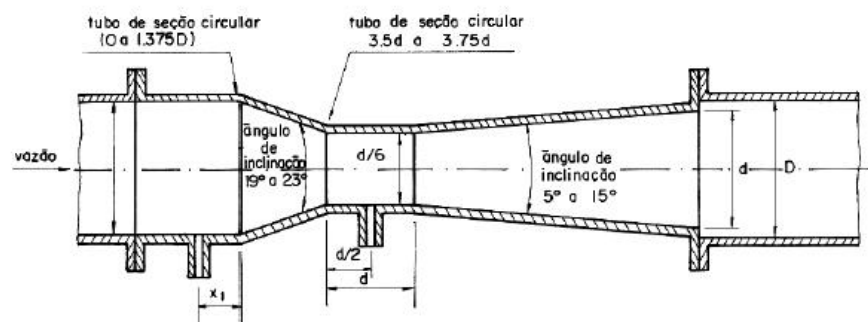


Figura 21 – Tubo de Venturi com Difusor Curto.

Outro tipo usado é o do “**TIPO RETANGULAR**” utilizado em dutos de configuração retangular como os utilizados para ar em caldeira a vapor.

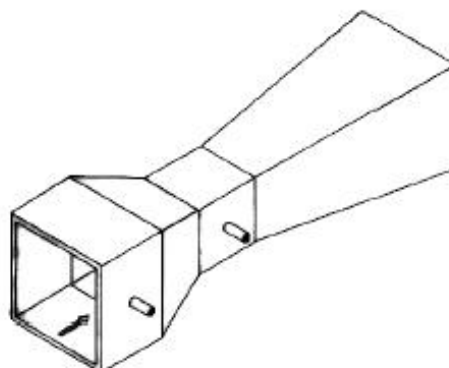


Figura 22 – Tubo de Venturi Retangular.

**CARACTERÍSTICAS DO TUBO VENTURI:** o tubo VENTURI apresenta algumas vantagens em relação a outros medidores de perda de carga variável como:

- ✓ Boa precisão (0,75%);
- ✓ Resistência a abrasão e ao acúmulo de poeira ou sedimentos;
- ✓ Capacidade de medição de grandes escoamentos de líquidos em grandes tubulações;
- ✓ Permite medição de vazão 60% superiores à placa de orifício nas mesmas condições de serviço, porém com perda de carga de no máximo 20% do. P.

Algumas das desvantagens no tubo VENTURI:

- ✓ Custo elevado (20 vezes mais caros que uma placa de orifício);
- ✓ Dimensões grandes e incômodas;
- ✓ Dificuldade de troca uma vez instalado.

*NOTA: Os métodos para a obtenção da vazão utilizando o “TUBO DE VENTURI” são análogos aos já vistos com as “PLACAS DE ORIFÍCIO”.*

**TUBO DE PITOT:** É um dispositivo utilizado para medição de vazão através da velocidade detectada em um determinado ponto de tubulação. O tubo de Pitot é um tubo com uma abertura em sua extremidade, sendo esta, colocada na direção da corrente fluida de um duto, mas em sentido contrário. A diferença entre a pressão total e a pressão estática da linha nos fornecerá a pressão dinâmica a qual é proporcional ao quadrado da velocidade.

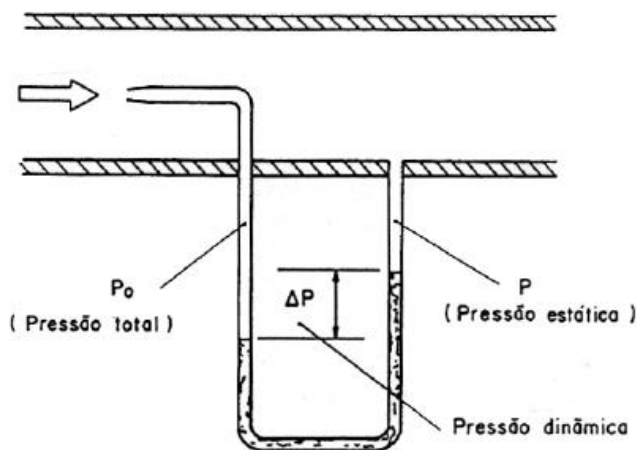


Figura 23 – Configuração de um Tubo de Pitot.

Utilizando o tubo Pitot, determina-se um diferencial de pressão, que corresponde a pressão dinâmica e com o valor dessa pressão através da fórmula abaixo, obtemos a velocidade de um ponto de medição.

$$PD = \frac{\gamma V^2}{2g} \Rightarrow V^2 = \frac{PD \times 2g}{\gamma} \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

PD = pressão dinâmica [kgf/cm<sup>2</sup>]

$\gamma$  = peso específico do fluido em [kgf/m<sup>3</sup>]

V = velocidade do fluido em [m/s]

g = aceleração da gravidade em [m/s<sup>2</sup>]

O tubo de Pitot mede apenas a velocidade do ponto de impacto e não a velocidade média do fluxo. Assim sendo, a indicação da vazão não será correta se o tubo de impacto não for colocado no ponto onde se encontra a velocidade média do fluxo. Pesquisadores, concluíram que o valor da velocidade média seria 0,8 da velocidade máxima do duto. Outra forma de calcularmos a velocidade de escoamento de um fluido em um tubo de Pitot é a utilização da equação de Bernoulli, aplicando-a nos pontos P<sub>1</sub> e P<sub>2</sub> temos:

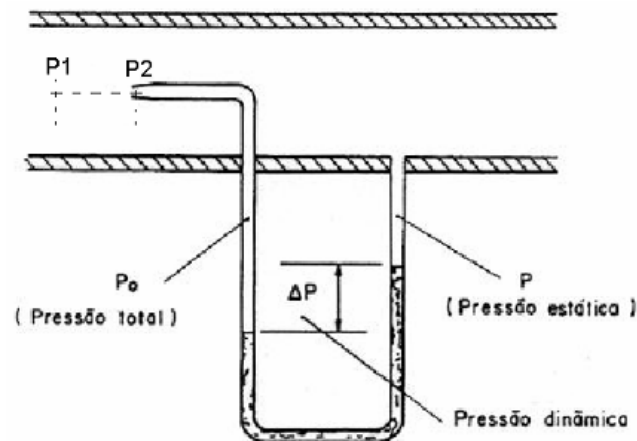


Figura 24 – Configuração de um Tubo de Pitot P<sub>1</sub> e P<sub>2</sub>.

$$P_1 + \frac{\rho V_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho V_2^2}{2} \quad \text{mas } V_2 = 0 \text{ e } P_1 - P_2 = \rho g \Delta h$$

$$\rho g \Delta h = -\frac{\rho V_1^2}{2} \therefore V_1 = \sqrt{2g\Delta h}$$

$$V_1 = \sqrt{2g\Delta h} \quad (\text{Equação 11})$$

Onde:

$V_1$  = velocidade de escoamento no ponto 1 em [m/s]

$\Delta h$  = diferença da pressão anotada no tubo “U” em [m]

$g$  = aceleração da gravidade em [m/s<sup>2</sup>]

A vazão neste tipo de sistema pode ser obtida multiplicando a velocidade de escoamento pela área da secção transversal no mesmo ponto.

$$Q = V_1 A_1 \quad (\text{Equação 12})$$

Onde:

$Q$  = vazão em [m<sup>3</sup>/s]

$V_1$  = velocidade de escoamento do fluido no ponto 1 em [m/s]

$A_1$  = área da secção transversal no ponto 1 (tubulação) em [m<sup>2</sup>]

**TUBO DE DALL:** em época mais recente foi desenvolvido um dispositivo conhecido como tubo de DALL, para proporcionar uma recuperação de pressão muito maior do que a obtida por um tubo VENTURI. Diferentemente do tubo VENTURI, que apresenta garganta paralela, o tubo de DALL é desprovido de garganta, é menor e mais simples. Possui um curto cone de convergência, que começa em diâmetro algo inferior diâmetro de conduto uma derivação no tubo, nesse ponto. Há a seguir um espaço anular na “garganta”, seguido pelo cone divergente, o fluido ao passar pelo tubo, pode entrar pelo espaço anular entre o tubo de DALL que funciona como um revestimento interno do tubo e, este último transmitindo assim, uma pressão média, do “gargalo”, ao instrumento de medida através de uma derivação no tubo, nesse ponto.

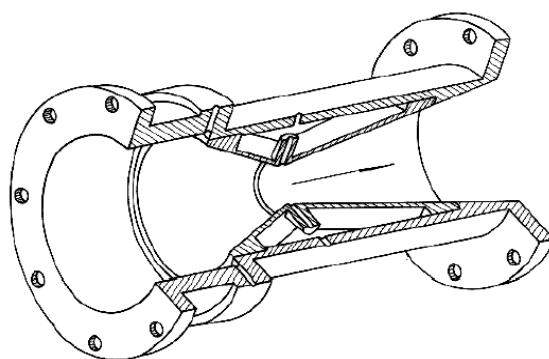


Figura 25 – Configuração de um Tubo de DALL.

## CARACTERÍSTICA DO TUBO DE DALL

- ✓ Para tubulações de diâmetro pequeno onde o limite do número de REYNOLDS é 50.000, para tubulações com diâmetros superiores, o número de REYNOLDS é ilimitado.
- ✓ Não utilizável para fluidos contendo sólidos, o qual sedimenta-se na garganta ovalada e causa erosão no canto vivo.
- ✓ A tomada de alta pressão do tubo de DALL, encontra-se localizada na entrada da parte convergente do tubo.
- ✓ A tomada de baixa pressão encontra-se localizada no final do cone convergente, “gargalo”, início do cone divergente.
- ✓ A mesma é disposta através de um anel perfurado do qual nos dá a média das pressões medidas

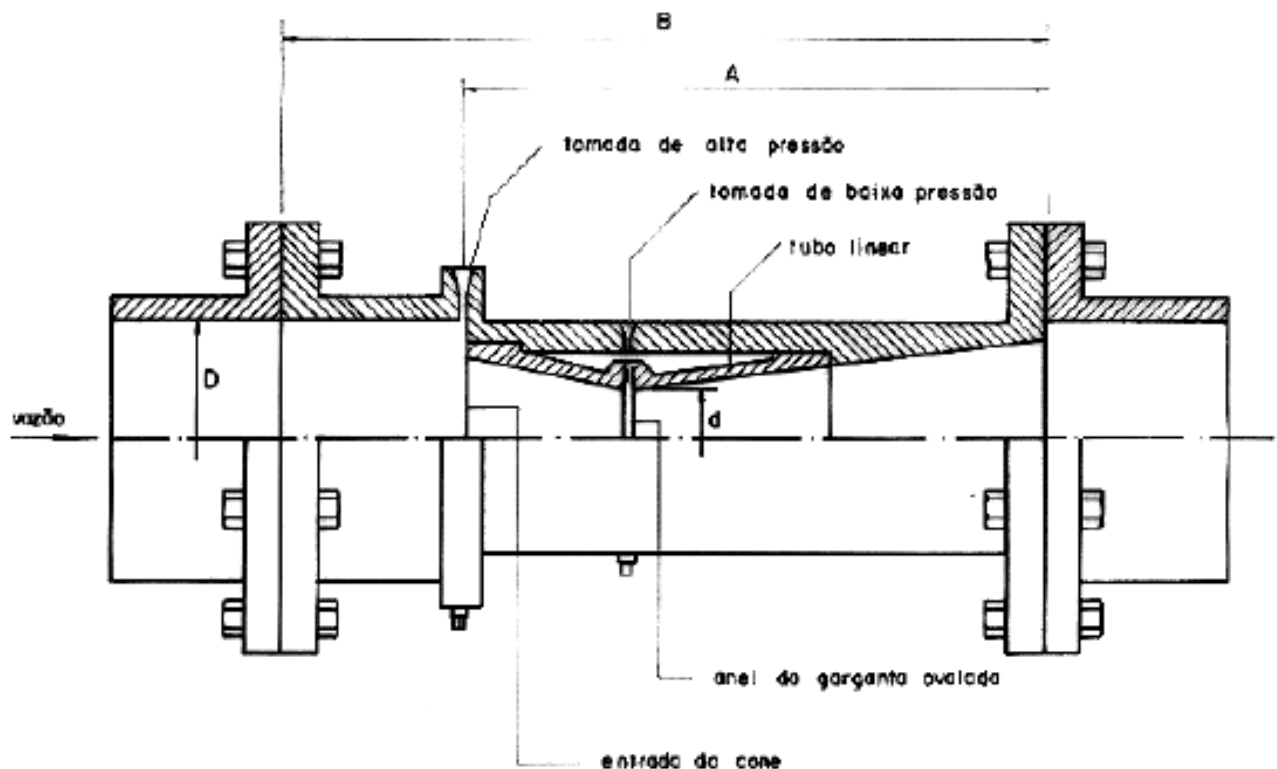


Figura 26 – Pontos onde se tem a Tomada de Alta e Baixa Pressão no Tubo de DALL.

**ANNUBAR:** Este dispositivo consiste em um pequeno par de pontos de prova sensoras de pressão montadas perpendicularmente ao fluxo.

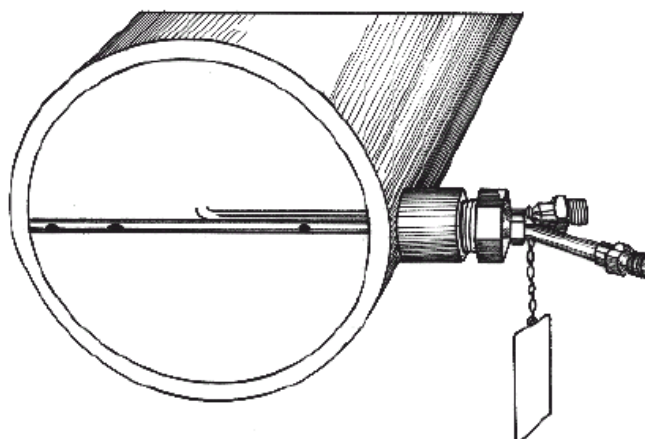


Figura 27 – Annubar

A barra sensora de pressão a jusante possui um orifício que está posicionado no centro do fluxo de modo a medir a pressão do fluxo a jusante. A barra sensora de pressão de montante possui vários orifícios, estes orifícios estão localizados criteriosamente ao longo da barra, de tal forma que cada um detecta a pressão total de um anel. Cada um destes anéis tem área da seção transversal exatamente igual às outras áreas anulares detectadas por cada orifício.

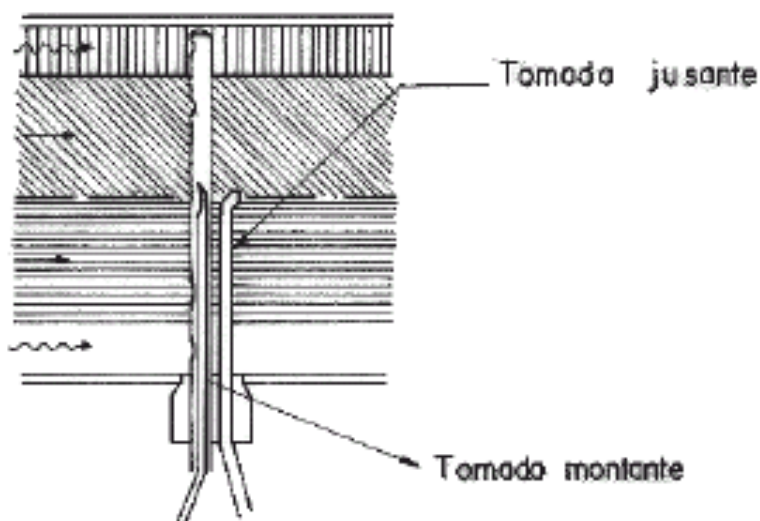


Figura 27 – Distribuição das Tomadas de Fluxo para o Annubar

Outra característica do elemento de fluxo tipo Annubar é que quando bem projetado tem capacidade para detectar todas as vazões na tubulação a qual está instalado, sendo a vazão total a média das vazões detectadas.



## ÁREA VARIÁVEL (PERDA DE CARGA CONSTANTE)

Vamos abordar alguns dos instrumentos medidores de vazão mais comumente utilizados no qual o conceito básico para se extrair a medida de vazão é através variação da área, mantendo a perda de carga constante.

**ROTÂMETRO:** em sua mais simples elementar forma, o rotâmetro consiste de duas partes:

- ✓ Um tubo de vidro cônico colocado verticalmente na tubulação, cuja extremidade maior é dirigida para cima
- ✓ Um flutuador livre, que se move verticalmente no tubo de vidro cônico

Nos rotâmetros é difícil o acúmulo de impurezas, devido à velocidade do fluido e ao deslocamento do flutuador e garantia da precisão do rotâmetro está na leitura direta da vazão.

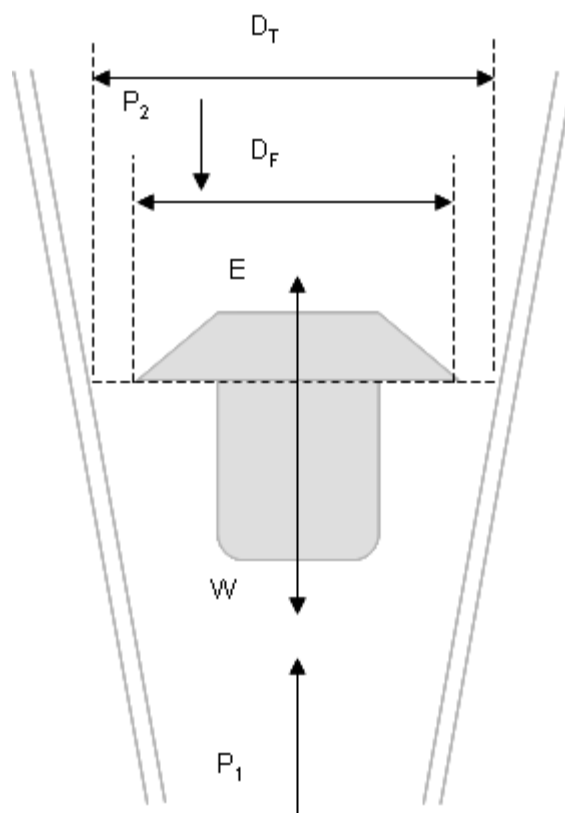


Figura 28 – Diagrama de Funcionamento de um Rotâmetro

A vazão em um rotâmetro pode ser obtida pela expressão:

$$Q = C.A.\sqrt{\frac{2.g.h}{W}} \quad (\text{Equação 13})$$

Onde:

Q: vazão (m<sup>3</sup>/s)

C: coeficiente de descarga

A: área anelar do flutuador (m<sup>2</sup>)

h: altura do flutuador (m)

W: peso do flutuador (kg)

g: aceleração da gravidade (9.81m/s<sup>2</sup>)

## MEDIDORES DE VOLUME DO FLUIDO PASSANTE

São instrumentos de medição de vazão que se utilizam da movimentação do fluido para a obtenção dos valores.

**RODAS OVAIS:** este transdutor permite a medição de vazão de forma direta sem a dependência de outros fatores como densidade, PH, etc, mediante ao deslocamento positivo das engrenagens ovais sob a influência da passagem do fluido, são empregados na medição de vazão para fluidos viscosos, em que é freqüente a dificuldade de aplicar outros tipos de medidores. A vazão é extraída em função da diferença de pressão entre montante e jusante.

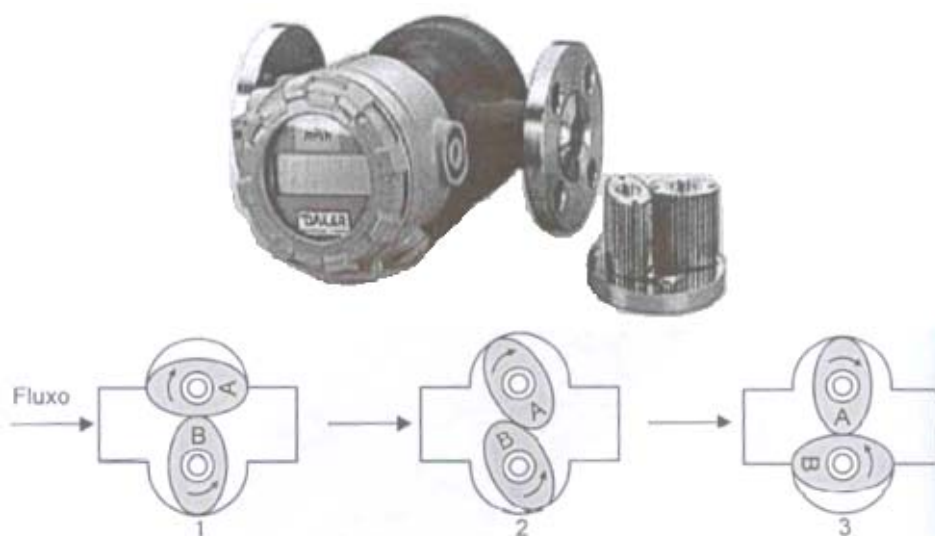


Figura 29 – Diagrama de Funcionamento das Rodas Ovais

## MEDIDORES DE VELOCIDADE (PELO IMPACTO DO FLUIDO)

São transdutores que se utilizam do impacto do fluido sobre elementos como paletas, hélices, etc..

**TURBINA:** São transdutores usados apenas para fluídos líquidos, são constituídos de um gerador a imã permanente colocado em rotação pelo líquido, que atua sobre as paletas. O rotor induz uma tensão alternada com frequência variável nos terminais de uma bobina colocada externamente ao invólucro da tubulação, que é de material magnético. A frequência é proporcional à velocidade média do líquido e conseqüentemente, proporcional à vazão.

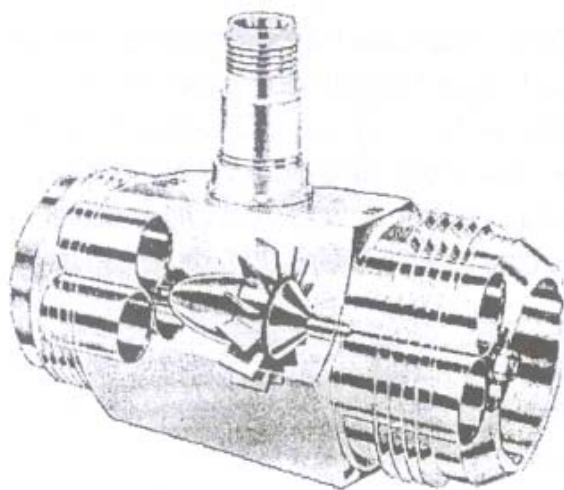


Figura 30 – Diagrama de Funcionamento de uma Turbina

## MEDIDORES ESPECIAIS

São instrumentos que fazer uso de conceitos eletro-magnético, ultra-sônico, Fio quente, entre outros para a obtenção da vazão.

**ELETRO-MAGNÉTICO INDUTIVO:** Este tipo de transdutor é usado com fluidos eletrolíticos. É constituído de uma seção de tubo não magnético e não condutor, no qual são colocados duas bobinas e um anel de ferro laminado. O campo magnético é gerado pela bobina alimentada por uma corrente alternada, induz, pelo efeito velocidade do fluxo condutor, uma tensão vêm dessa fonte conectada a dois eletrodos colocados sobre o eixo ortogonal ao campo magnético e da velocidade.

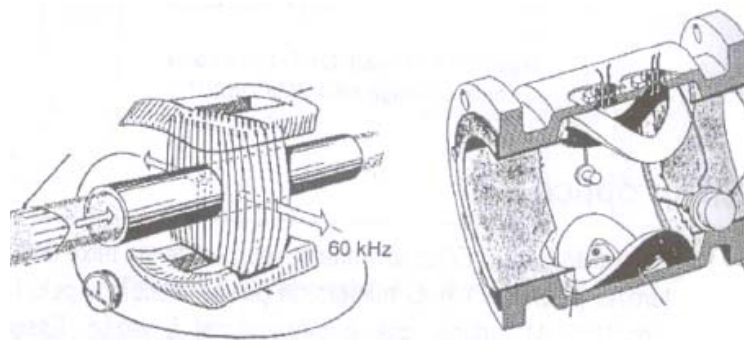


Figura 31 – Diagrama de Funcionamento de Eletro Magnético Indutivo.

A tensão na saída que pode ser relacionada à valores de vazão pode ser expressa pela relação:

$$E = K.d.B.v \quad (\text{Equação 13})$$

Onde:

E: tensão em [V]

K: constante de proporcionalidade

d: comprimento do condutor em [m]

B: Campo magnético

v: velocidade do fluxo condutor [m/s]

**EXERCÍCIOS**

1. Relacione os conceitos aos tipos de medição de vazão.

- |                        |     |  |
|------------------------|-----|--|
| a. Vazão Volumétrica   | ( ) | É a quantidade em peso que passa por uma certa seção por unidade de tempo.   |
| b. Vazão Mássica       | ( ) | É a quantidade em peso que passa por uma certa seção por unidade de tempo.   |
| c. Vazão Gravitacional | ( ) | É definida como sendo a quantidade em volume que escoar através de certa seção em um intervalo de tempo considerado. |

2. Relacione as unidades de medida.

- |                        |     |                     |
|------------------------|-----|---------------------|
| a. Vazão Mássica       | ( ) | [m <sup>3</sup> /s] |
| b. Vazão Gravitacional | ( ) | [kg/s]              |
| c. Vazão Volumétrica   | ( ) | [Kg/h]              |

3. Calcule a vazão de um fluido que escoar através de um tubo de PITOT, sendo que a tubulação mede 2" de diâmetro e a pressão dinâmica é de  $\Delta h = 10$  mm.

4. Por uma seção escoam 47 m<sup>3</sup>/h de água. Determine a vazão volumétrica em [m<sup>3</sup>/s] e mássica em [kg/s].

5. Um manômetro diferencial apresenta em seu mostrador o valor de 100 KPa e está instalado em uma tubulação com diâmetro de 4" e um orifício calibrado com diâmetro quatro vezes menor, sendo o fluido corrente água determine a vazão.

6. Em uma tubulação com raio igual a 100 mm é instalada uma placa de orifício com diâmetro de 100 mm. Observando o tubo em "U", foi anotada uma variação da altura da coluna líquida (pressão dinâmica) de 25 mm, sendo o fluido corrente água determine a vazão.

7. Em uma tubulação está instalado um rotâmetro no qual foi observado um deslocamento ascendente em seu flutuador de 5 cm. Sabe-se que o fluido em questão é água, o diâmetro da secção anelar do flutuador é de 3 cm e possui peso igual a 100 gramas. Determine a vazão do processo.

## MEDIDA DE NÍVEL

Os dispositivos de medida de nível medem ou a posição da superfície do líquido em relação a um ponto de referência ou a leitura hidrostática criada pelo líquido cuja superfície se deseja conhecer, os métodos de medição de nível podem ser classificados como, medidores diretos e medidores indiretos.

**MEDIDA DIRETA:** se caracterizam pela obtenção do nível de fluido diretamente com auxílio de mecanismos como, bóias, visores de nível, contato de eletrodos, entre outros.

**VISORES DE NÍVEL:** Os visores de nível baseiam-se no princípio dos vasos comunicantes. Não se deve usar em locais onde o visor constitua perigo com sua quebra e não devem ser aplicados em reservatórios onde o líquido ofereça perigo ao escapar do interior do visor.

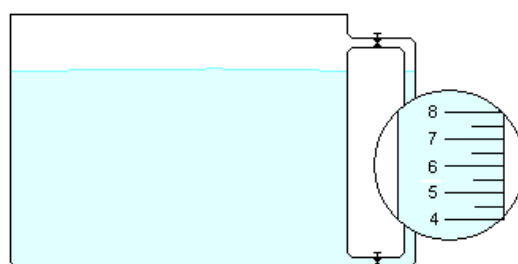


Figura 32 – Medição Através de Visores de Nível.

**BÓIAS:** é o sistema mais comum de medição de nível e sua grande vantagem é ser praticamente isenta do efeito de variação de densidade do líquido e ser adequada para medir grandes variações de nível, da ordem de até 30 m. Uma de suas desvantagens é ser muito sensível à agitação do líquido. As medidas de nível para estes tipos de instrumentos podem ser obtidas diretamente mediante uma escala graduada (Figura 33) ou através de um circuito elétrico dotado de um Potenciômetro o qual diante da variação da resistência é possível estabelecer uma relação com o nível (Figura 34).

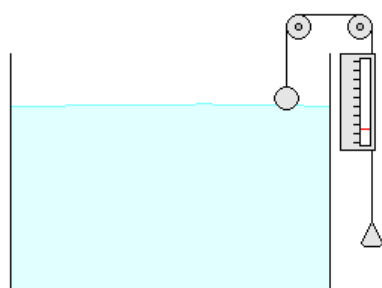


Figura 33 – Medição Através de Escala

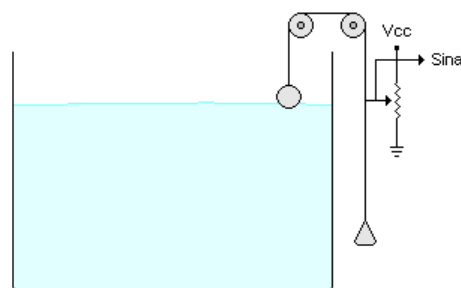


Figura 34 – Medição Através de Potenciômetro

**MEDIDA INDIRETA:** se caracterizam pela obtenção do nível de fluido com o auxílio de outros elementos sensores, os quais podem se estabelecer uma relação entre a variação no elemento sensor e o nível. Estas medições podem ser obtidas por meio de pressão estática no fundo dos tanques, como, borbulhamento, caixa de diafragma, por meio de medição de empuxo através da utilização de um corpo imerso e ainda através de medidores especiais como capacitância variável, isótopos radioativos entre outros tipos de efeitos que estudaremos no futuro.

**BORBULHAMENTO PARA RECIPIENTES ABERTOS:** este método é utilizado quando a densidade do líquido é constante. Consiste em se introduzir no líquido, cujo nível se quer medir, uma tubulação com alimentação de ar, a pressão constante e cuja vazão é também mantida constante por um regulador. De acordo com a pressão hidrostática do líquido, haverá borbulhamento do ar pela extremidade inferior da tubulação e a pressão no manômetro estará em equilíbrio com a pressão exercida pelo líquido no fundo do reservatório. A pressão de alimentação de ar deverá ser obviamente, maior que aquela gerada pela altura útil do reservatório. O regulador de vazão é utilizado com a finalidade de:

- ✓ Evitar a formação de bolhas grandes, que provocariam oscilação na pressão manométrica;
- ✓ Evitar perda de carga ao longo da tubulação, através de uma baixa vazão.

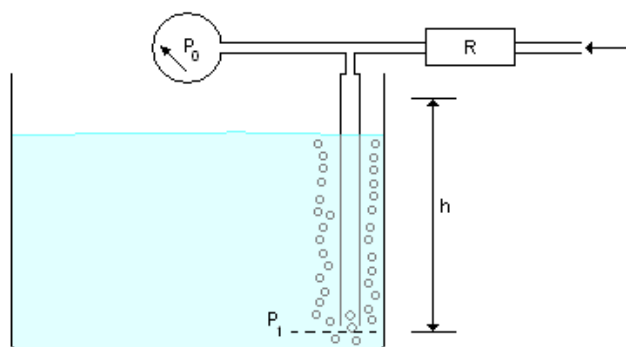


Figura 35 – Medição Através do Processo de Borbulhamento (RA)

A obtenção do nível pode ser obtida através do conceito de pressão hidrostática, uma vez que a pressão injetada no tanque é conhecida e o fluido também a relação pode ser expressa por:

$$h = \frac{P}{\rho \cdot g} \quad (\text{Equação 14})$$



Onde:

$h$ : altura da coluna de fluido em [m]

$P$ : pressão imposta ao sistema em [N/m<sup>2</sup>]

$\rho$  = massa específica [kg/m<sup>3</sup>]

$g$  = aceleração da gravidade [m/s<sup>2</sup>]

**BORBULHAMENTO PARA RECIPIENTES FECHADOS:** este método é indicado para recipientes fechados e o nível de fluido pode ser determinado em função das diferenças da massa específica entre os dois fluidos e a relação entre as alturas “ $h_1$  e  $h_2$ ” mostrado na figura abaixo.

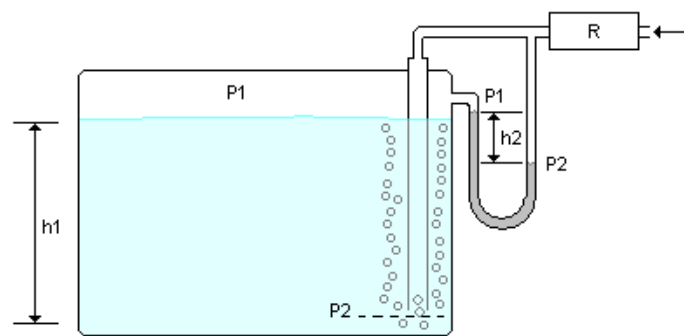


Figura 36 – Medição Através do Processo de Borbulhamento (RF)

A obtenção do nível para esse tipo de sistema pode ser expressa por:

$$h_1 = \frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot h_2 \quad (\text{Equação 15})$$

Onde:

$h_1$ : nível de fluido no tanque em [m]

$h_2$ : ação da pressão diferencial em [m]

$\rho_1$  = massa específica do fluido do reservatório [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_2$  = massa específica do fluido do elemento sensor [kg/m<sup>3</sup>]

**CAIXA DE DIAFRÁGMA:** Analisando a figura abaixo, podemos observar que a membrana flexível está sujeita a uma pressão externa dada por “ $pgh$ ”. Esta pressão causará um deslocamento da membrana comprimindo o ar no interior da caixa. Quando a pressão interna da caixa se igualar à pressão externa cessará o movimento da membrana. A pressão interna da caixa é transmitida a um manômetro, calibrado para

leitura de  $h$ , por meio de um tubo capilar. Utiliza-se o tubo capilar para que a variação de volume seja desprezível.

É um tipo simples e econômico de medida de nível, mas serve somente para tanques abertos e sua resposta se torna mais lenta, à medida que o comprimento do capilar cresce, é utilizado para medidas de nível até 40 m de altura com capilar de 1/8 de polegada de diâmetro externo.

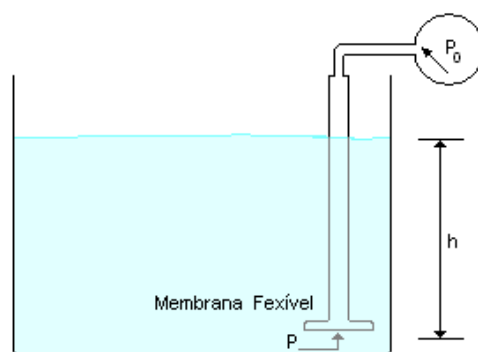


Figura 37 – Medição Através do Processo de Borbulhamento Utilizando Caixa de Diafragma

A obtenção do nível pode ser obtida através do conceito de pressão hidrostática utilizando a “Equação 14”.

**CORPO IMERSO:** Consiste simplesmente de um flutuador comprido colocado dentro do líquido e acoplado a um tubo de torção. O flutuador praticamente não se move. Em função do nível, o empuxo que o líquido exerce sobre o flutuador acoplado a um tubo de torção é transformado em movimento rotativo. Este movimento pode ser empregado para indicar, regular ou transmitir a posição do nível.

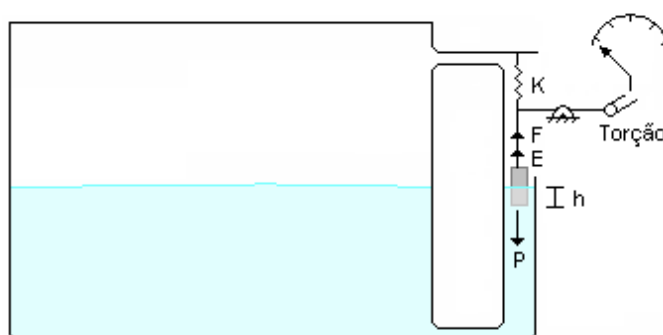


Figura 38 – Medição Através do Processo de Corpo Imerso

**MEDIDORES ESPECIAIS:** se caracterizam pela utilização de outros tipos de sensores acoplados ao sistema a fim de se estabelecer uma relação entre a variação sofrida pelo instrumento e o nível do fluido a ser monitorado.

**CAPACITÂNCIA VARIÁVEL:** consiste em se mergulhar uma barra de conduíte isolada no fluido. Formar-se-á entre a barra e o fluido uma capacitância que será proporcional ao nível da substância medida. Essa variação da capacitância é medida numa ponte, e é em função da área do líquido encostada no condutor  $C = f(S)$ .

A grande vantagem no emprego desse sistema é que podemos usá-lo para qualquer líquido, quer seja corrosivo ou não, por causa do material isolante. Portanto, esse tipo leva uma grande vantagem sobre os medidores que utilizam eletrodos, mas é de custo elevado.

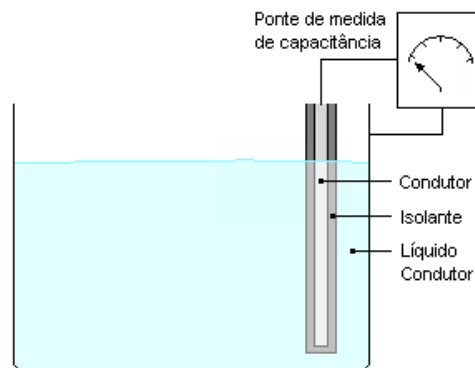


Figura 39 – Medição Através da Capacitância Variável

Algumas restrições para o uso desse método:

- ✓ Deve-se observar que a parte do condutor que não está sob o nível d'água não pode estar molhada, pois isto conduziria a medidas errôneas (aumento da capacitância);
- ✓ Só pode ser usado para líquidos condutores

**EXERCÍCIOS**

1. Relacione os conceitos aos tipos de medição de nível.

- |                        |       |  |
|------------------------|-------|--|
| a. Medição Direta      | (   ) | Borbulhamento, Caixa de Diafragma, Corpo Imerso. |
| b. Medidores Especiais | (   ) | Visores de Nível, Bóias.                         |
| c. Medição Indireta    | (   ) | Capacitância Variável, Isótopos Radioativos.     |

2. O nível de um reservatório aberto é controlado mediante ao processo de “borbulhamento”, a pressão hidrostática é de  $98\,000\text{ N/m}^2$ . Determine o nível de água ( $\rho=10^3\text{ kg/m}^3$ ) no reservatório. (utilize  $g=9,8\text{ m/s}^2$ ).

3. O nível de um reservatório é controlado mediante ao processo de “borbulhamento”, um manômetro apresenta em seu mostrador uma pressão de 26 psi ( $179,725\text{ N/m}^2$ ). Como se trata de um reservatório aberto sobre a superfície livre da água ( $\rho = 10^3\text{ kg/m}^3$ ) tem a ação da pressão atmosférica que é de  $101325\text{ N/m}^2$ . Determine o nível de água no reservatório. (utilize  $g=9,8\text{ m/s}^2$ ).

4. Determine o nível e volume de água em um reservatório fechado com dimensões iguais a  $\varnothing 4\text{m}$  e altura de  $6\text{m}$  sendo que a variação da pressão diferencial cuja massa específica é de  $1,36 \times 10^4\text{ kg/m}^3$  (mercúrio) foi de  $200\text{ mm}$ .

## MEDIDA DE FORÇA OU MOMENTO

Em muitos processos industriais é necessário o monitoramento de cargas aplicadas ao sistema, um dos sensores mais utilizados para essas aplicações são as células de carga conhecidas como “STRAIN GAUGES”.

STRAIN GAUGES são extensômetros resistivos de ampla utilização em engenharia. Tais sensores são utilizados para a medição de deformações de estruturas mecânicas, prestando-se também para o desenvolvimento de ferramentas específicas de medição como células de carga, torquímetro, etc..

Os extensômetros baseiam-se na variação da resistência de um condutor elétrico quando submetido a uma deformação mecânica. A resistência elétrica de um condutor uniforme pode ser descrita como função de seu comprimento  $L$ , seção transversal  $A$  e resistividade  $\rho$  (segunda lei de Ohm).

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (\text{Equação 16})$$

Onde:

R: Resistência em  $[\Omega]$

P: Coeficiente de resistência do material em  $[\Omega]$

L: Comprimento do fio resistivo em  $[m]$

A: Área da seção transversal resistente em  $[m^2]$

Com base na lei de Ohm mencionada acima podemos identificar o comportamento da variação da resistência sob a influência dos esforços mecânicos de “TRAÇÃO” e “COMPRESSÃO”.

**TRAÇÃO:** quando um condutor é tracionado seu comprimento aumenta e a área da seção transversal diminui proporcionando um aumento da resistência.

**COMPRESSÃO:** quando um condutor é comprimido o seu comprimento diminui e conseqüentemente a área da seção transversal aumenta proporcionando a diminuição da resistência.

Os STRAIN GAUGES devem ser escolhidos de acordo com o tipo de deformação ao qual se deseja medir:

**FLEXÃO (BENDING):** mede as deformações de tração ou compressão decorrentes do carregamento de viga em balanço. Normalmente utilizada em medições de 0,5 a 200 quilos.

**CISALHAMENTO (SHEAR BEAM):** mede as deformações geradas por tensões de cisalhamento atuantes. Normalmente utilizada de 200 quilos a 50 toneladas.

**COMPRESSÃO (CANISTER):** mede as tensões de compressão geradas pela carga. Esse tipo de célula é utilizado normalmente para forças acima de 50 toneladas de intensidade.

## FORÇA OU MOMENTO?

Estes sensores têm por finalidade fornecer informação do quanto de força e ou momento o atuador está fazendo, a fim de podermos controlar a força a ser aplicada. O que chamados de STRAIN GAUGES são na verdade resistores laminados, de superfície ou fios que colados em uma peça variam sua resistência quando esta peça se deforma devido a uma força.

Como podemos observar na figura abaixo o STRAIN GAUGES sofre a ação de duas forças, vamos analisar separadamente.

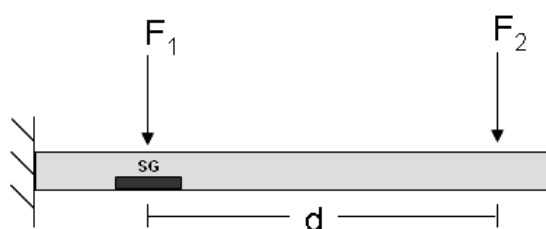


Figura 40 – Forças Atuantes sobre o Strain Gauges

**1º CASO:** Analisando apenas a força  $F_1$  temos a ação da força  $F_1$  agindo diretamente no STRAIN GAUGES.

**2º CASO:** Nesse caso a ação sobre o STRAIN GAUGES é a do momento exercido pela força  $F_2$ , pois  $M_o = F \cdot d$

## FATOR DE GAGE

O “Fator de Gauge” pode ser definido como a sensibilidade da liga metálica do condutor, como a razão entre as variações específicas de resistência de deformação.

$$FG = S_A = \frac{dR/R}{dL/L} = \frac{dR/R}{\varepsilon} \quad (\text{Equação 17})$$

Onde:

FG = Fator de Gage (AS = Sensibilidade)

dR/R = Variação da resistência em [ $\Omega$ ]

dL/L = Variação do comprimento em [m]

*NOTA: Valores experimentais de SA para diferentes tipos de materiais resistivos encontram-se entre os limites de 2,0 e 4,0. A maioria dos materiais utilizados para a construção dos extensômetros resistivos possui sensibilidade em torno de 2,0.*

Mediante aos materiais mais utilizados temos como resistências elétricas usuais: 120  $\Omega$  e 350  $\Omega$  e aplicações especiais 1000  $\Omega$ .

Tabela 01: Características das Ligas Mais Utilizadas

LIGA	COMPOSIÇÃO %	FATOR DE GAGE	LIMITE DE DEFORMAÇÃO
Constantan	45 Ni , 55 Cu	2,0	$\pm 5\% = \pm 50000 \mu$
Advance	45 Ni , 55 Cu	2,1	$\pm 1,5\% = \pm 15000 \mu$
Karma	74 N , 20 Cr , 3 Al, 3Fe	3,6	$\pm 0,5\% = \pm 5000 \mu$
Iso Estatic	36 Ni, 8 Cr, 0,5 Mo, 55,5 Fe	2,5	$\pm 2,5\% = \pm 25000 \mu$

Efeitos que limitam a medição:

- ✓ Sensibilidade Transversal
- ✓ Umidade
- ✓ Temperatura
- ✓ Deformações Cíclicas
- ✓ Corrente Elétrica

## APLICAÇÕES

Os extensômetros resistivos são de grande utilidade quando as deformações a serem medidas encontram-se nas superfícies da estrutura mecânica a ser monitorada. Mesmo assim, os processos de colagem, cura do adesivo, soldagem dos terminais elétricos dos sensores e a montagem do circuito de ponte requerem experiência e habilidade do usuário.

Abaixo podemos ver alguns tipos de extensômetros

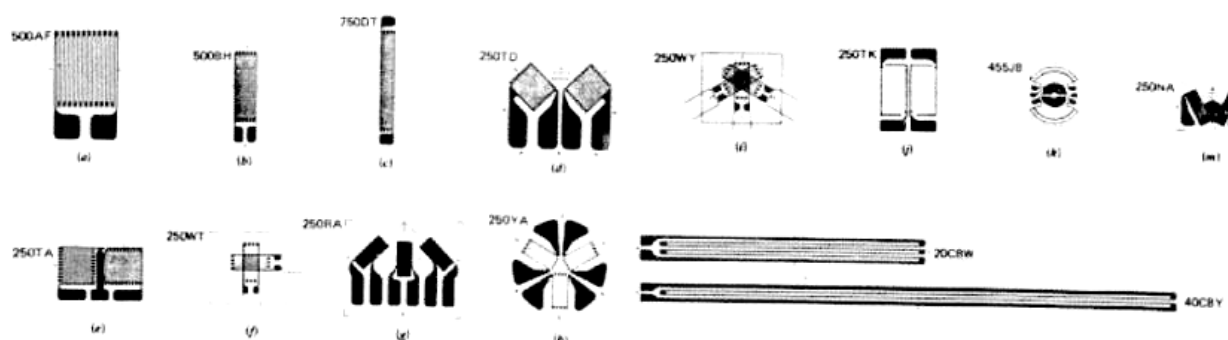


Figura 41 – Tipos e Formatos de Strain Gauges

## MÉTODO DE MEDIÇÃO

Os extensômetros variam a resistência e com isso é necessário do auxílio de um circuito adicional para que possamos condicionar o sinal para que permita converter a sua deformação e conseqüente mudança de resistência elétrica, em uma tensão proporcional medida em Volts. Tais circuitos, chamados pontes extensométricas, são baseados no princípio de equilíbrio de tensão das pontes resistivas de Wheatstone, ilustrada na figura abaixo.

O funcionamento da ponte pode ocorrer através da aplicação de uma tensão de alimentação estabilizada ou através de um sinal de tensão alternada de alta frequência.

O caso de emprego de uma tensão de alimentação modulada em frequência é utilizado com sucesso na minimização da influência de ruídos na leitura da voltagem proporcional a deformação, exigindo, contudo um dispendioso circuito de modulação, demodulação e comparação de fase dos sinais elétricos de referência de operação da ponte.



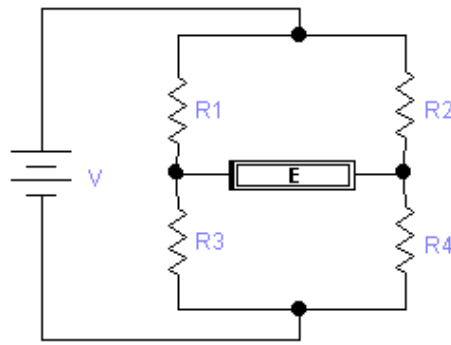


Figura 41 – Circuito Ponte de Wheatstone

A tensão de saída na ponte balanceada em função da variação de sensores acoplados ao sistema é expressa por:

$$E = V \cdot \frac{(R_1 \cdot R_4) - (R_2 \cdot R_3)}{(R_1 + R_3) \cdot (R_2 + R_4)} \quad (\text{Equação 18})$$

Onde:

E: tensão de saída em [V]

V: tensão de alimentação em [V]

R: elementos resistivos (resistores ou strain gauges) [ $\Omega$ ]

## ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO

A utilização do circuito em ponte balanceada nos permite montagens em  $\frac{1}{4}$  de ponte,  $\frac{1}{2}$  ponte e ponte completa, para cada caso têm que analisar as deformações sofridas pelo STRAIN GAUGE.

**MONTAGEM EM  $\frac{1}{4}$  PONTE:** nesta montagem utilizamos apenas um sensor acoplado ao sistema e a deformação é expressa por:

$$\varepsilon = \frac{4 \cdot E}{V \cdot FG} \quad (\text{Equação 19})$$

Onde:

$\varepsilon$ : deformação;

E: tensão de saída em [V]

V: tensão de alimentação em [V]

FG: Fator de Gauge em função da liga

**MONTAGEM EM ½ PONTE:** nesta montagem utilizamos dois sensores acoplados ao sistema e a deformação é expressa por:

$$\varepsilon = \frac{2.E}{V.FG} \quad (\text{Equação 20})$$

Onde:

$\varepsilon$ : deformação;

E: tensão de saída em [V]

V: tensão de alimentação em [V]

FG: Fator de Gauge em função da liga

**MONTAGEM EM PONTE COMPLETA:** nesta montagem utilizamos QUATRO sensores acoplados ao sistema e a deformação é expressa por:

$$\varepsilon = \frac{E}{V.FG} \quad (\text{Equação 21})$$

Onde:

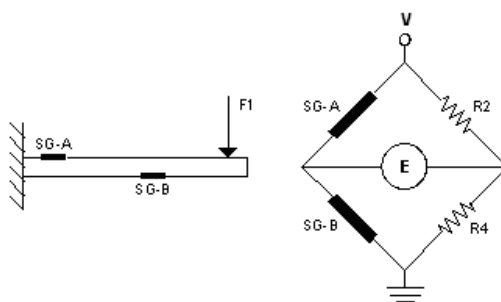
$\varepsilon$ : deformação;

E: tensão de saída em [V]

V: tensão de alimentação em [V]

FG: Fator de Gauge em função da liga

**EXEMPLO:** vamos calcular a deformação sabendo que os “strain gauges” são compostos pela liga “constantan” (FG=2.0 - Limite de Deformação  $\pm 5\% = \pm 50000 \mu$ ).



DADOS:

V = 12 Volts

Ponte Balanceada em  $120 \Omega$

$\Delta SG_A = 3 \Omega$

$\Delta SG_B = 1 \Omega$

## RESOLUÇÃO

1. Encontrar os valores de resistência dos strain gauges mediante aos esforços mecânicos.

$$SG_A \text{ TRAÇÃO} = 120 + 3 \Rightarrow SG_A \text{ TRAÇÃO} = 123 \Omega$$

$$SG_B \text{ COMPRESSÃO} = 120 - 1 \Rightarrow SG_B \text{ COMPRESSÃO} = 119 \Omega$$

2. Substituindo os valores na “Equação 18” temos:

$$E = V \cdot \frac{(SG_A \cdot R_4) - (SG_B \cdot R_3)}{(SG_A + SG_B) \cdot (R_2 + R_4)} \Rightarrow E = 12 \cdot \frac{(123 \times 120) - (119 \times 120)}{(123 + 119) \cdot (120 + 120)}$$

$$E = 12 \cdot \frac{480}{58080} \Rightarrow E = 0,099V$$

2. Mediante a configuração em  $\frac{1}{2}$  ponte vai substituir os valores na “Equação 20” :

$$\varepsilon = \frac{2.E}{V.FG} \Rightarrow \varepsilon = \frac{2 \times 0,099}{12 \times 2} \Rightarrow \varepsilon = 0,0083$$

3. Comparando a deformação no sistema com a deformação admissível  $\pm 0,05$

$$\varepsilon_{adm} > \varepsilon_{sistema}$$

$$0,05 > 0,0083 \quad \text{OK !!}$$

**EXERCÍCIOS**

1. Strain Gauge pode ser definido como:

- a. (   )      Elemento sensor que varia a sua resistência em função da deformação mecânica.
- b. (   )      A sensibilidade da liga metálica do condutor, como a razão entre as variações específicas de resistência de deformação.
- c. (   )      Elemento sensor para medição direta de nível.
- d. (   )      Nenhuma das Alternativas

2. Relacione os conceitos aos tipos de medição de nível.

- |               |       |  |
|---------------|-------|--|
| a. Shear Beam | (   ) | Mede deformações de tração e compressão em vigas em balanço (0,5 à 200 kg) |
| b. Canister   | (   ) | Utilizado para esforços de cisalhamento (200 kg à 50 T)                    |
| c. Bending    | (   ) | Mede as tensões de compressão geradas pela carda (acima de 50 T)           |

3. O princípio de funcionamento de um “Strain Gauge” baseia-se:

- a. (   )      Na Segunda Lei de Ohm -  $R=\rho.(L/A)$
- b. (   )      Na Primeira Lei de Ohm -  $U=R.I$
- c. (   )      Em ambas as leis de Ohm.
- d. (   )      Nenhuma das Alternativas.

4. Cite os efeitos que limitam a medição com strain gauges.

---

---

---

5. Descreva o princípio de funcionamento dos sensores extensômetros.

---

---

---

---

6. Defina Fator de Gauge.

---

---

---

---

7. Qual o principal circuito de acondicionamento utilizado para medições com strain gauges? Explique seu funcionamento.

---

---

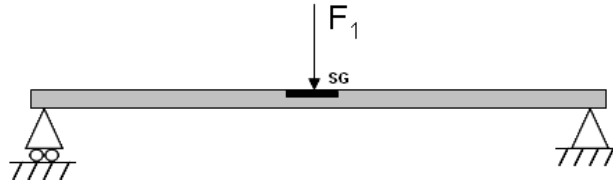
---

---

8. Dado o croqui abaixo identifique o tipo de grandeza atuando sobre o sensor (força ou momento) o esforço exercido (tração ou compressão) e calcule o alongamento, sabendo que o strain gauges (constantan) é de  $120\Omega$  e sofreu uma variação de  $5\Omega$ . Tensão de entrada igual a 12 Volts.



9. Dado o croqui abaixo identifique o tipo de grandeza atuando sobre o sensor (força ou momento) o esforço exercido (tração ou compressão) e calcule o alongamento sabendo que o strain gauges (constantan) de  $120\Omega$  teve uma variação de  $3\Omega$ . Tensão de entrada igual a 10 Volts.



## MEDIDA DE POSIÇÃO

Em processos industriais ou comerciais, os sensores de posição são utilizados em várias aplicações em que a precisão e a sensibilidade do instrumento devem ser ajustadas em função do tipo de operação que é monitorado. Têm grande importância na fabricação de máquinas de ferramentas em que é necessário definir a posição da ferramenta de corte para chegar a um micrômetro, fundamental na produção de peças industriais.

Neste capítulo iremos abordar conceitos e características dos sensores:

- ✓ Indutivos;
- ✓ Capacitivos;
- ✓ Magnéticos (Reed Switch);
- ✓ LVDT;
- ✓ RVDT;
- ✓ Potenciométricos;
- ✓ Encoders.

**SENSORES INDUTIVOS:** São dispositivos de proximidade sem contato que utilizam um campo de frequência de rádio com um oscilador e uma bobina.

A presença de um objeto altera esse campo e o circuito eletrônico pode descobrir a alteração. Um sensor de proximidade indutivo é constituído por:

- ✓ Um circuito oscilador LC;
- ✓ Um comparador de sinal;
- ✓ Um chaveador.

Se um objeto metálico se aproxima da face sensora, são geradas correntes de remoinho, as perdas resultantes tiram a energia do circuito oscilador reduzindo as oscilações, o comparador de sinal converte essa informação em sinal claro sendo amplificado para saída com o auxílio de um transistor NPN ou PNP.

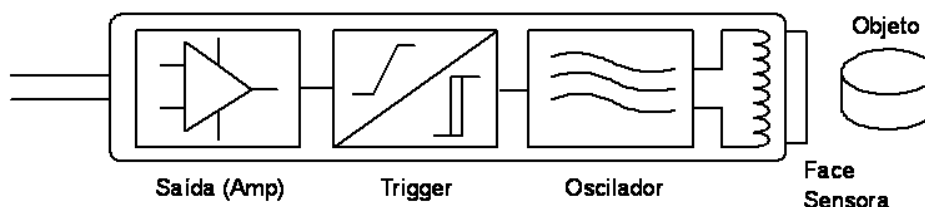


Figura 41 – Diagrama de Funcionamento de um Sensor Indutivo

## DISTÂNCIA DE ACIONAMENTO x FREQUÊNCIA DE COMUTAÇÃO

A distância nominal de acionamento  $S_n$  é um dado do sensor de aproximação apresentado nas tabelas dos fabricantes. A distância real de acionamento  $S_r$  pode afastar-se em até 10% da distância nominal de acionamento, pois depende de fatores como temperatura e o material a ser detectado.

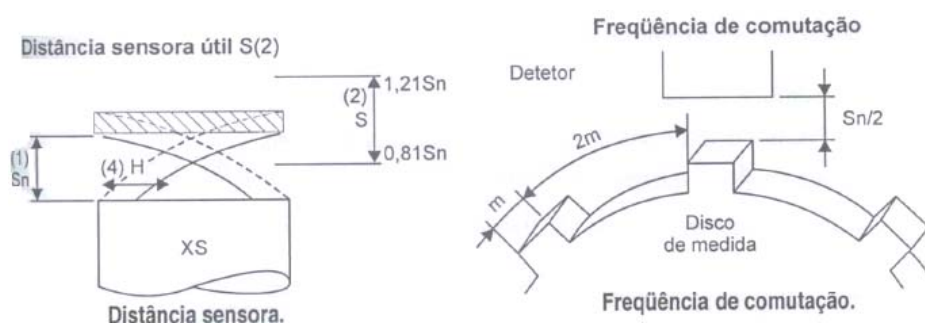


Figura 42 – Distância de Acionamento e Frequência de Comutação

## PRECAUÇÕES

Efeitos de metais e influência mútua: quando o sensor for instalado num painel metálico ou instalar duas ou mais unidades do mesmo sensor frente a frente ou lado a lado garanta uma distância mínima de forma que as placas ou outros sensores não atuem sobre o sensor em questão, ou seja, uma distância que assegure que o sensor seja atuado apenas pelo objeto a ser detectado.

## CARACTERÍSTICAS GERAIS

Os sensores indutivos apresentam algumas características comuns, independentes do tipo de aplicação, dentre quais podemos destacar:

- ✓ Não possuem peças móveis e atuam sem contato;
- ✓ São totalmente vedados, tornando possível o uso em água, óleos, etc



- ✓ Têm grande precisão na repetição do ponto de comutação;
- ✓ Substituem com vantagens as chaves fim de curso e microchaves.

## APLICAÇÃO

Os detectores de proximidade são concebidos para realizar as seguintes tarefas:

- ✓ Controle de presença ou ausência, fim de curso;
- ✓ Detecção de passagem, de posicionamento;
- ✓ Contagem de peças.

Sua utilização é particularmente recomendada quando:

- ✓ A velocidade de ataque e o funcionamento são elevados;
- ✓ Em condições ambientais severas, presença de poeira óleo de corte, agentes químicos, umidade, vapores, choques e vibrações;
- ✓ Peças a detectar são de pequenas dimensões ou frágeis;
- ✓ Automatismo estático.

Os detectores de proximidade são freqüentemente utilizados em:

- ✓ Máquinas de montagem, operatrizes, usinagens e prensas;
- ✓ Máquinas de embalagem, transporte e armazenagem.

**SENSORES CAPACITIVOS:** os sensores de proximidade capacitivos são projetados para operar gerando um campo eletrostático e detectando mudanças nesse campo, que acontece quando o alvo se aproxima da face ativa. As partes internas do sensor são:

- ✓ Uma ponta capacitiva;
- ✓ Um oscilador;
- ✓ Um retificador de sinal;
- ✓ Um circuito de filtragem;
- ✓ Um circuito de saída;

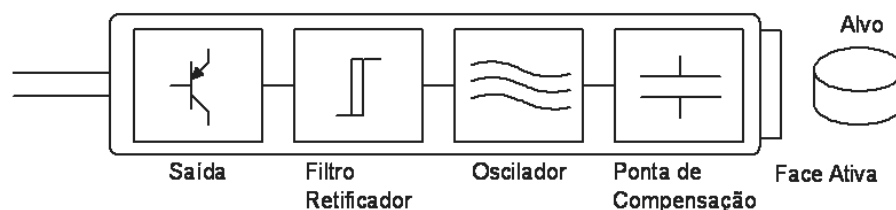


Figura 43 – Diagrama de Funcionamento de um Sensor Capacitivo

Na ausência do alvo o sensor está inativo. Quando o alvo se aproxima, ele aumenta a capacitância do circuito com a ponta de compensação, quando a capacitância atinge um valor determinado, o oscilador é ativado, o que ativa o circuito de saída e faz com que ele comute seu estado.

A capacitância do circuito com a ponta de compensação é determinada pelo tamanho do alvo, sua constante dielétrica e a distância até a ponta. Quanto maior o tamanho e a constante dielétrica do alvo mais ele aumenta a capacitância. Quanto menor a distância entre a ponta e o alvo maior a capacitância.

## SENSORES CAPACITIVOS BLINDADOS x NÃO BLINDADOS

Os sensores capacitivos blindados são mais indicados para a detecção de materiais de constantes dielétricas baixas. Já os não blindados são mais indicados para materiais com constantes dielétricas mais altas.

## APLICAÇÃO

Os sensores de proximidade capacitivos são mais indicados para detectar materiais metálicos e não metálicos, tais como:

- ✓ Água, óleo;
- ✓ Pós, grãos;
- ✓ Papelão;
- ✓ Plásticos;
- ✓ Vidros;
- ✓ Cerâmica;
- ✓ Outros;

## APLICAÇÃO

Este tipo de sensor pode ser utilizado para:

- ✓ Controle de nível de silos;
- ✓ Contagem de caixas em linha de produção;
- ✓ Conferir presença de líquidos em frascos.

**SENSORES MAGNÉTICOS:** Os sensores de proximidade magnéticos se baseiam no uso de campos magnéticos e convertem esse campo em um sinal elétrico. Esses sensores podem ser eletrônicos e a ampola reed.

Sensores de proximidade magnéticos são baseados no uso de um “Reed Switch” e um ímã permanente. O ímã pode ser parte do objeto a ser detectado ou do sensor. O dispositivo é projetado de modo que a presença do objeto na região do sensor ative a chave, enviando um sinal para o controle.

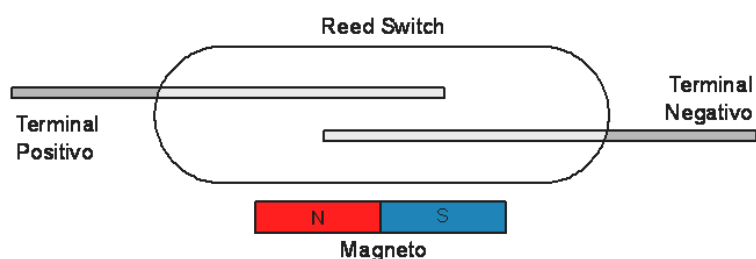


Figura 44 – Diagrama de Funcionamento de um Sensor Magnético

**LVDT:** A construção física de um transformador linear diferencial variável (LVDT) consiste em um núcleo de material magnético móvel e três bobinas que compreendem o transformador estático. Uma dessas três bobinas é o enrolamento primário e as outras duas são as bobinas secundárias.

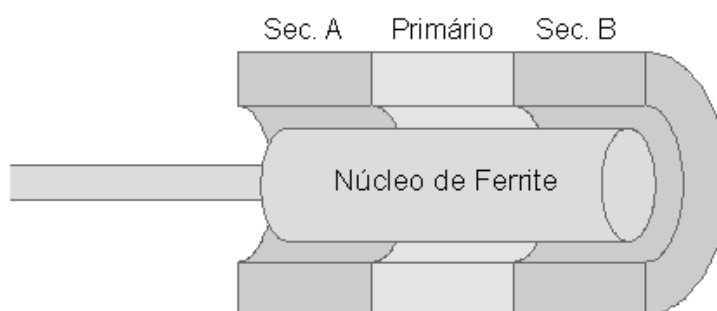


Figura 45 – Diagrama de Funcionamento de um LVDT

A fórmula básica do transformador, cuja voltagem é proporcional ao número de espiras da bobina, é o fundamento do LVDT e é expressa por:

$$\frac{V_{saída}}{V_{entrada}} = \frac{N_{saída}}{N_{entrada}} \quad (\text{Equação 22})$$

Onde:

V: tensão em volts;

N: número de espiras.

Quando o núcleo de ferro desliza pelo transformador, um certo número de voltas da bobina é afetado pela proximidade e assim gera uma única voltagem de saída.

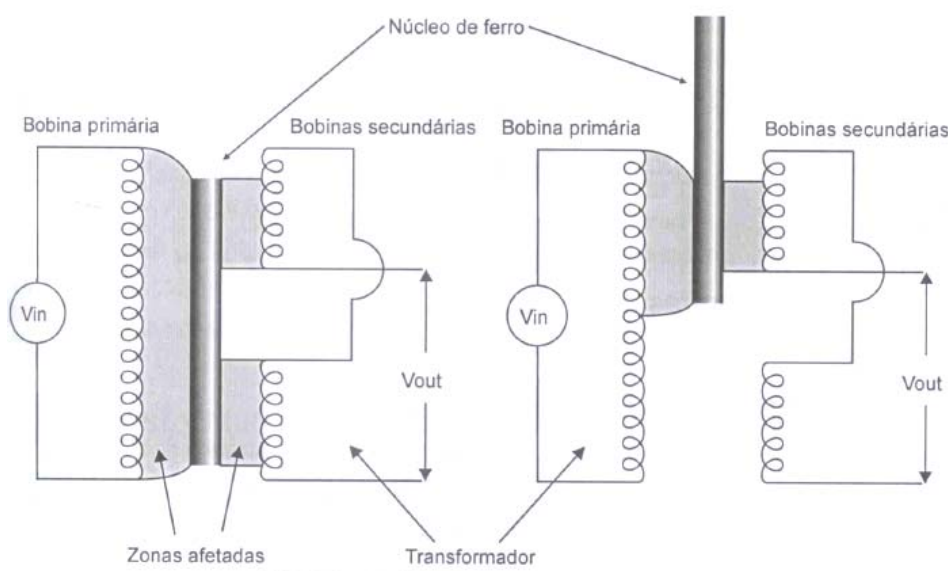


Figura 46 – Influência do Núcleo no Transformador do LVDT

**LVDT COM ENROLAMENTO ABERTO:** este tipo é conhecido como enrolamento aberto, desde que certo número de voltas da bobina é uniformemente distribuído ao longo do transformador, a voltagem de saída é proporcional ao deslocamento do núcleo de ferro quando desliza pelo transformador:

$$D = M \cdot V_{saída} \quad (\text{Equação 23})$$

Onde:

D: deslocamento do núcleo de ferro em relação ao transformador;

M: é a sensibilidade do transformador (inclinação da curva de deslocamento versus voltagem)

**LVDT COM ENROLAMENTO PROPORCIONAL:** Outro tipo de enrolamento do LVDT é conhecido como proporcional, como ilustra a figura abaixo.

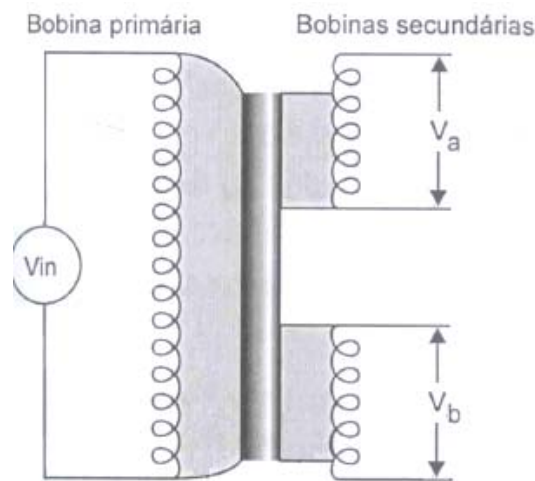


Figura 47 – LVDT com Enrolamento Proporcional

## PRÓS E CONTRAS DO USO DO LVDT

### PRÓS

- ✓ Custo relativamente baixo devido à sua popularidade;
- ✓ Sólido e robusto, capaz de ser utilizado em diversos ambientes;
- ✓ Sem resistência por atrito, desde que o núcleo de ferro não entre em contato com o transformador, resultando uma vida praticamente infinita;
- ✓ Alta razão entre sinal e ruído e baixa impedância de saída;
- ✓ Histerese desprezível;
- ✓ Apresenta uma ótima resolução;
- ✓ Pequeno tempo de resposta;
- ✓ Sem dano ao LVDT se a medida exceder a faixa de trabalho determinada pelo equipamento.

### CONTRAS

- ✓ O núcleo deve estar em contato com a superfície a ser medida;
- ✓ As medidas de distância são limitadas para não mais de um décimo da frequência de ressonância do LVDT. Na maioria dos Casos

## APLICAÇÃO

Embora o LVDT seja um sensor de deslocamento, muitas outras quantidades físicas podem ser medidas, convertendo em outras grandezas através de relações matemáticas. Assim pode ser empregado em:

- ✓ **Deslocamento:** extensômetros, transdutores de temperatura (dilatação), controle de válvulas, sensoriamento de abertura de válvulas;
- ✓ **Deflexão de vigas, fios ou anéis:** células de carga, transdutores de força ou de pressão;
- ✓ **Variação de espessura em peças:** medidas de espessura de perfil, classificação de produtos por tamanho;
- ✓ **Nível de fluido:** medida de nível e fluxo de fluido, sensoriamento de posição em cilindros hidráulicos;
- ✓ **Velocidade e aceleração:** controle de suspensão automotiva

**RVDT:** é utilizado na medida de ângulos e opera com o mesmo princípio do sensor LVDT.

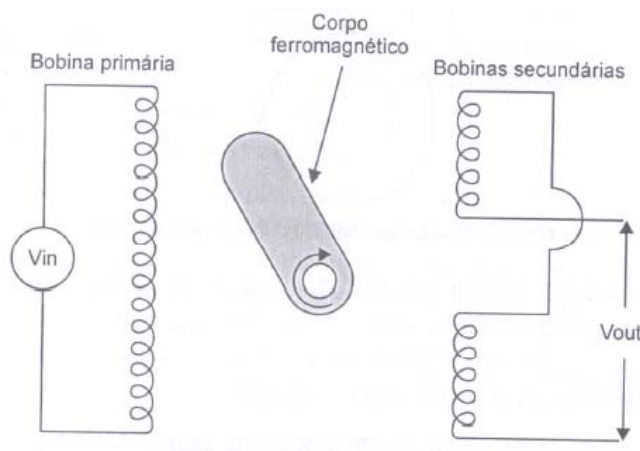


Figura 48 – Esquema Típico de um RVDT.

## ESPECIFICAÇÕES

- ✓ Potência de entrada é de 3 a 15 Vrms em onda senoidal com frequência entre 60 e 20.000 Hz.
- ✓ Capaz de medir rotação continuamente, porém a maioria dos RVDT têm eficiência acima de  $\pm 60\%$ .
- ✓ São altamente lineares

**POTENCIOMÉTRICO:** O potenciômetro consiste de um elemento resistivo e um contato deslizante. É fornecido com três terminais: um em cada ponta do elemento resistivo e um no contato deslizante. Este contato pode mover-se longitudinalmente em um elemento resistivo linear, ou ser conectado a um eixo e rotacionar deslizando sobre um elemento resistivo circular, mostrado nas figuras abaixo.

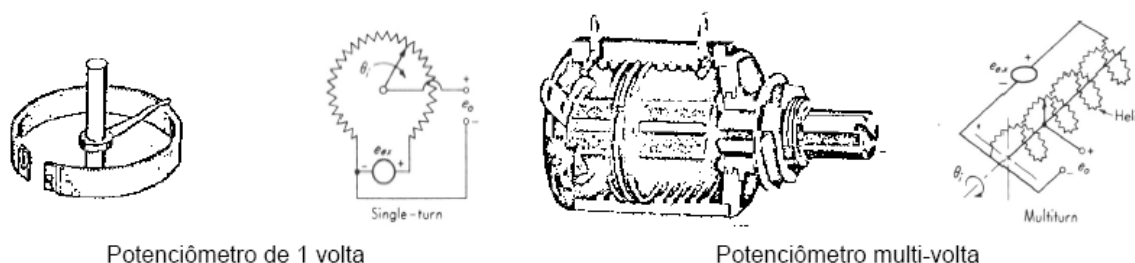


Figura 49 - Tipos de Potenciométricos Angulares.

O sinal de saída é medido entre o contato deslizante e um dos terminais do elemento resistivo. Por possuir uma única volta, este tipo de potenciômetro possui uma resolução limitada. Este tipo de transdutor é muito usado em sistemas de controle em malha fechada, para cálculo de posição, por ser de baixo custo e de fácil manuseio. A situação é diferente com o potenciômetro multi-voltas, Neste caso o fio é enrolado como um espiral, e o contato deslizante caminham através da espira, o que aumenta consideravelmente a resolução.

As desvantagens encontradas se verificam em função do atrito entre o contato deslizante e o elemento resistivo, causando ruídos nas medidas, e também, no caso de se trabalhar com sistemas digitais, a necessidade de conversor A/D. Este tipo de transdutor pode ser utilizado em um robô manipulador para monitorar a posição angular de uma junta de revolução ou a posição linear de uma junta de translação

## PRÓS E CONTRASS DO POTENCIOMÉTRICO

### PRÓS

- ✓ Barato;
- ✓ Simples;
- ✓ Absoluto;
- ✓ Robusto;

## CONTRAS

- ✓ Pouco exato;
- ✓ Baixa resolução;
- ✓ Impõe carga ao sistema;
- ✓ Contatos deterioram;

## PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Seja  $R$  a resistência elétrica de um POT alimentado com uma tensão de entrada,  $V_{in}$ , como ilustra a figura abaixo para um POT linear.

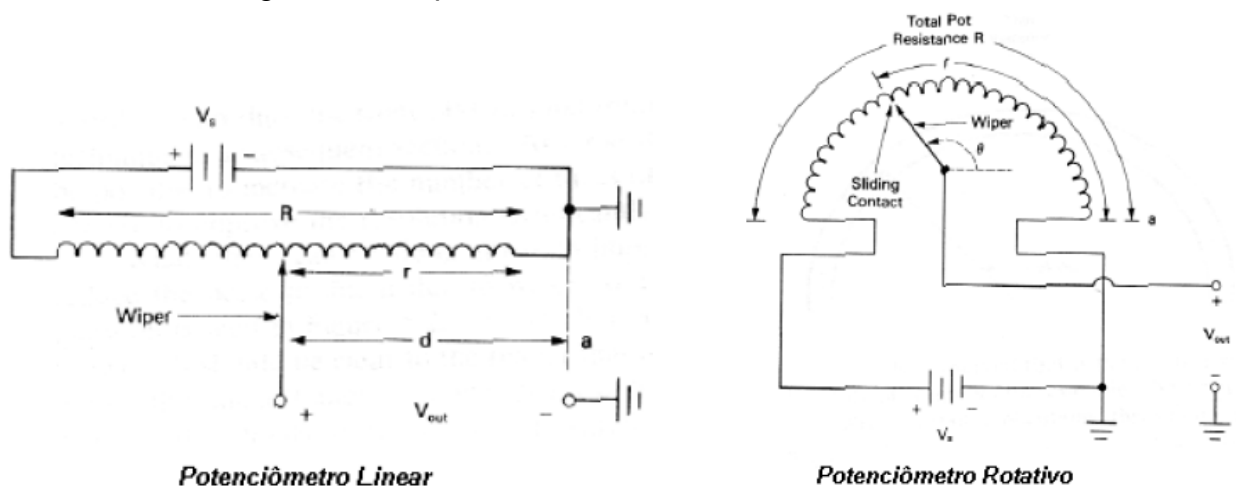


Figura 50 - Princípio de Funcionamento dos Potenciométricos.

Após o deslocamento angular " $\theta$ " ou " $d$ ", a tensão de saída é dada por  $V_{out}$ , conforme equação:

$$V_{out} = \frac{r}{R} \cdot V_{in} \quad (\text{Equação 24})$$

Onde:

$V_{in}$ : tensão de alimentação [V]

$V_{out}$ : tensão de saída [V]

$r$ : resistência parcial sob a influência do cursor deslizante [ $\Omega$ ]

$R$ : resistência total do sensor [ $\Omega$ ]



**ENCODER:** é um dispositivo que fornece ao controlador de robôs e máquinas informações sobre o status físico das várias juntas do robô (inclusive taxas de movimento). Em outras palavras, o encoder é uma unidade de realimentação (feedback unit), que informa sobre as posições atuais das juntas do robô, de forma que possam ser comparadas com posições desejadas e seus movimentos sejam planejados. Esta unidade de realimentação possibilita o controle em malha fechada, em arranjo simples de componentes opto-eletrônico, como na abaixo.

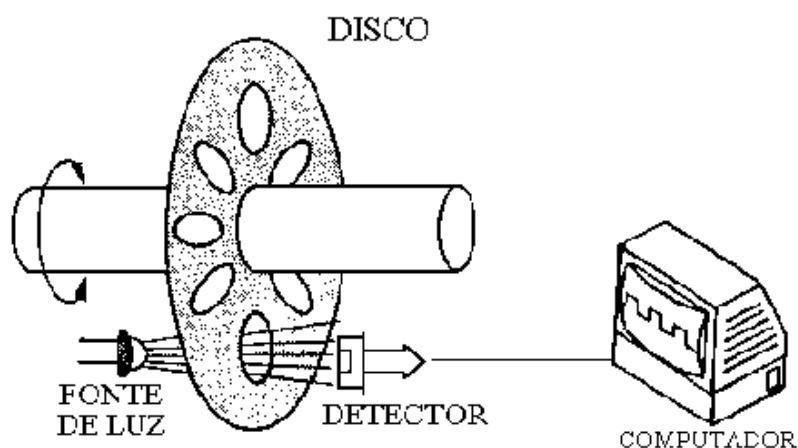


Figura 51 - Princípio de Funcionamento dos Encoders.

Neste caso têm-se uma fonte de luz, um receptor e um disco perfurado, que irá modular a recepção da luz, este disco está preso a um eixo ou motor, de forma a criar um movimento rotacional, enquanto que a fonte de luz e o receptor estão fixos. A rotação do disco cria uma série de pulsos pela interrupção ou não da luz emitida ao detector. Estes pulsos de luz são transformados pelo detector em uma série de pulsos elétricos e a frequência do pulso é diretamente proporcional ao número de rotações no intervalo de tempo, e ao número de furos ao longo do disco.

Os encoders são geralmente montados nas juntas do robô, ou nos eixos dos motores que atuam em cada uma das juntas. O encoder deve ser montado preferencialmente nas juntas, pois desta forma suas informações são diretamente coletadas, evitando possíveis incertezas de medição. A função do encoder é de fornecer informações em duas áreas:

- ✓ Quantidade de movimento executado pelo motor (ou pela junta);
- ✓ Direção do movimento (horário ou anti-horário).

Informações adicionais tais como taxa de movimento, podem ser obtidas pelo cálculo da divisão da quantidade de movimento pelo intervalo de tempo decorrido para tal movimento. Encoders óticos podem ser divididos em dois grupos:

- ✓ Encoders Incrementais;
- ✓ Encoders Absolutos

**ENCODERS INCREMENTAIS:** Este tipo de encoder fornece informações sobre o movimento executado e a direção da rotação do motor. Para determinar a quantidade de movimento realmente executada pelo motor, um disco com uma única fileira de furos é suficiente. Porém, para determinar a direção da rotação, precisa-se de duas fileiras de furos no disco como visto na figura abaixo.

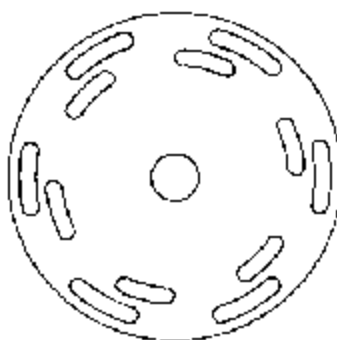


Figura 52 – Exemplo de Furação para Encoders Incrementais.

Para demonstrar o método utilizado para determinar o sentido de rotação, considere os sinais recebidos de dois detectores de luz, em quatro passos:

Tabela 02 – Sequências Geradas por uma Unidade de Contagem

PASSO	DETECTOR EXTERNO	DETECTOR INTERNO
1	Luz	Escuro
2	Luz	Luz
3	Escuro	Luz
4	Escuro	Escuro

## CÁLCULO DA RESOLUÇÃO DE UM ENCODER ÓTICO INCREMENTAL

Na “Figura 52” é possível observar que o disco possui dois anéis concêntricos de furos. Cada par de furos (anel interno e anel externo) compõe uma unidade de contagem. O

disco mostrado na figura 52 possui 6 pares de furos e desta forma 6 unidades são contadas a cada rotação completa do disco.

Assim pode-se deduzir que a resolução (S) é: circunferência do disco (em graus):

- ✓  $S_n = \text{disco}^\circ / n$  (em termos matemáticos o disco possui  $360^\circ$ )
- ✓ n é o número de pares de furos.
- ✓ Portanto a resolução do encoder da Figura 52 é:  $360/6$
- ✓  $S(6) = 60^\circ$

Os encoders óticos incrementais não fornecem informação sobre a localização absoluta do eixo de movimento no espaço, mais precisamente, eles fornecem a quantidade de movimento executada pelo eixo, começando do momento em que o computador é ativado e o movimento começa. Se o sistema é desligado ou ocorre uma queda de energia, a informação da localização do eixo de movimento é perdida e quando o sistema for religado, a posição dos eixos de movimento deve ser re-fixadas e somente após isto ser feito, o controlador poderá identificar a posição do robô novamente.

Apesar de fornecer informações incompletas, os encoders incrementais podem ser utilizados como dispositivos de realimentação para muitos sistemas industriais, através do uso de softwares especiais que analisam o número de pulsos enviados e calculam a posição relativa e a velocidade da junta em movimento.

**ENCODERS ABSOLUTOS:** os encoders óticos absolutos fornecem informações mais rigorosas que os encoders óticos incrementais. Possuem a capacidade de informar a posição física do robô assim que ele é ativado, sem a necessidade de fixação da posição inicial. Isto é possível porque o encoder transmite, para o controlador, um sinal diferente para cada posição da junta.

Abaixo é mostrado um disco contendo quatro anéis de perfurações e está dividido em 16 seções de arcos iguais, contendo cada uma um arranjo diferente de furos. Desta forma, cada seção possui uma combinação diferente de furos, possibilitando uma combinação diferente de sinais recebidos pelos quatro receptores. Quando o sistema é ativado, o controlador identifica a combinação dos sinais recebidos pelos receptores e transforma na exata localização da junta do robô no espaço.

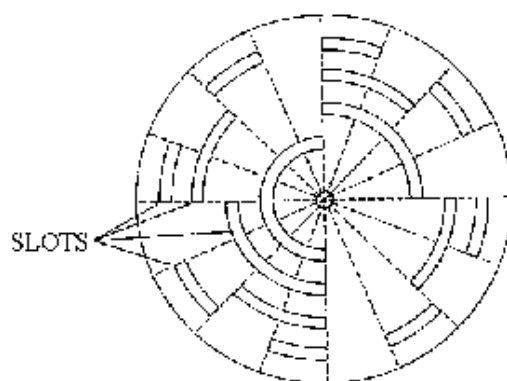


Figura 53 – Exemplo de Furação para Encoders Absolutos.

O número de anéis utilizados em um disco depende do grau de resolução de que se necessita. Quanto maior o número de anéis, maior será o número de combinações de sinais e maior será a resolução do dispositivo vista abaixo.

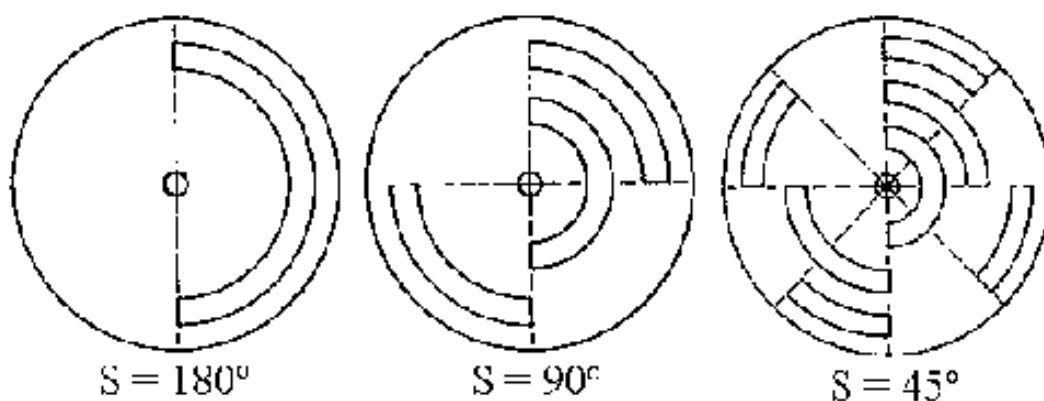


Figura 54 – Exemplo de Resolução em Função do Número de Anéis.

### CÁLCULO DA RESOLUÇÃO DE UM ENCODER ÓTICO ABSOLUTO

O cálculo da resolução (S) do encoder absoluto é dado por: circunferência do disco (em graus):

- ✓  $S_n = \text{disco}^\circ / n$
- ✓ Em termos matemáticos o disco possui  $360^\circ$
- ✓  $n$  é o número de segmentos que compõem o disco.
- ✓ Portanto a resolução do encoder da Figura 53 é:  $360/8$
- ✓  $S(8) = 45^\circ$

Analisado a Figura 55 abaixo, o disco do encoder está conectado ao eixo do motor e gira na mesma velocidade deste, entre duas coberturas de alumínio. Em uma delas estão montados dois LED's, que são as fontes de luz. Na outra cobertura estão dois foto transistores, que são os detectores de luz. Cada LED é montado diretamente oposto a um foto transistor, formando dois pares LED-fototransistor. Um deles está localizado próximo a borda do disco, e o outro próximo ao centro. Quando o disco gira, uma linha de luz aparece e desaparece alternadamente entre cada LED e seu foto transistor, causando condução e corte, respectivamente, da corrente entre o coletor e o emissor do foto transistor. Assim, o sinal de tensão entre o emissor e o coletor do foto transistor gera uma onda quadrada a qual é utilizada para se obter as informações desejadas.

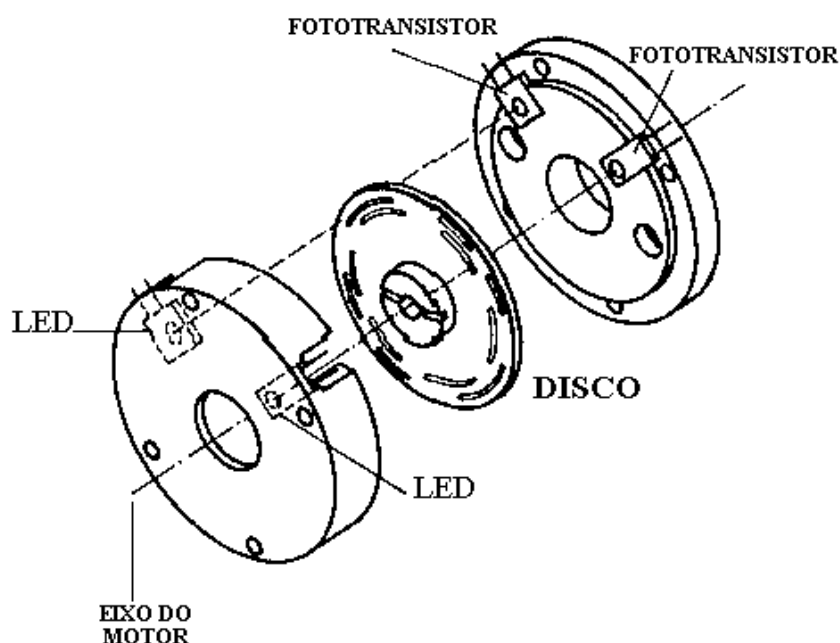


Figura 55 – Arquitetura de um Encoder Absoluto.

**EXERCÍCIOS**

## 1. Relacione os conceitos.

- |                         |     |   |
|-------------------------|-----|---|
| a. Sensores Capacitivos | ( ) | É constituído em um núcleo de material magnético móvel e três bobinas que compreendem o transformador estático. Uma dessas três bobinas é o enrolamento primário e as outras duas são as bobinas secundárias.                         |
| b. Sensores indutivos   | ( ) | São unidades de realimentação (feedback unit), que informam sobre as posições atuais de juntas do robô, esteiras e outros dispositivos, de forma que possam ser comparadas com posições desejadas e seus movimentos sejam planejados. |
| c. Sensores Magnéticos  | ( ) | Consiste em um elemento resistivo e um contato deslizante. É fornecido com três terminais: um em cada ponta do elemento resistivo e um no contato deslizante.   |
| d. Potenciométrico      | ( ) | Dispositivo utilizado na medida de ângulos e opera com o mesmo princípio do sensor LVDT.  |
| e. LVDT                 | ( ) | São dispositivos projetados para operar gerando um campo eletrostático e detectando mudanças nesse campo, que acontece quando o alvo (metálico ou não metálico) se aproxima da face ativa.  |
| f. RVDT                 | ( ) | São baseados no uso de um “Reed Switch” e um ímã permanente. O ímã pode ser parte do objeto a ser detectado ou do sensor.   |
| g. Encoder's            | ( ) | São dispositivos de proximidade sem contato que utilizam um campo de frequência de rádio com um oscilador e uma bobina.   |

2. Cite três aplicações para os sensores indutivos e três para os sensores capacitivos.

---

---

---

---

3. Compare sensores capacitivos blindados de sensores capacitivos não blindados.

---

---

---

---

4. Comente os prós e contras na utilização de potenciômetro para o controle de deslocamento e posição.

---

---

---

---

5. Qual a tensão na saída de um potenciômetro de 10 voltas alimentado com uma tensão de 12 Volts dados os seguintes deslocamentos:

a.  $720^\circ$

c.  $1045^\circ$

e.  $853^\circ$

b.  $240^\circ$

d.  $937^\circ$

f.  $3189^\circ$

6. Em um eixo reto com curso de 2 metros é acoplado um sensor de lâmina resistiva (lâmina = 10 cm). Um sistema mecânico é encarregado de deslocar a lâmina proporcionalmente com o deslocamento do eixo, sendo assim se alimentarmos o sensor com 10 Volts identifique a posição do eixo dadas as leituras efetuadas na saída.

- |           |           |          |
|-----------|-----------|----------|
| a. 0,53 V | c. 10,7 V | e. 9,5 V |
| b. 1,7 V  | d. 12 V   | f. 4,7 V |

7 Relacione os conceitos referentes à encoders.

- |                        |       |  |
|------------------------|-------|--|
| a. Encoder Simples     | (   ) | Possui a capacidade de gerar informações como: quantidade de deslocamento, sentido de deslocamento, referência espacial. |
| b. Encoder Incremental | (   ) | Possui a capacidade de gerar informações como: quantidade de deslocamento.   |
| c. Encoder Absoluto    | (   ) | Possui a capacidade de gerar informações como: quantidade de deslocamento, sentido de deslocamento.                      |

8) Calcule a resolução para os encoder's.

- a. Incremental angular de 180 furos para cada fileira.
- b. Absoluto de 10 bits.
- c. Simples de 90 furos



## MEDIDA DE TEMPERATURA

O objetivo de se medir e controlar as diversas variáveis físicas em processos industriais é obter produtos de alta qualidade, com melhores condições de rendimento e segurança, a custos compatíveis com as necessidades do mercado consumidor. Nos diversos segmentos de mercado, químico, petroquímico, siderúrgico, cerâmico, farmacêutico, vidreiro, alimentício, papel e celulose, hidrelétrico, nuclear entre outros, a monitoração da variável temperatura é fundamental para a obtenção do produto final especificado.

Todas as substâncias são constituídas de pequenas partículas, as moléculas e que se encontram em continuo movimento. Quanto mais rápido o movimento das moléculas, mais quente se apresenta o corpo e quando mais lento mais frio se apresenta o corpo. Então se define Temperatura como o grau de agitação térmica das moléculas.

A "Medição de Temperatura" ou Termometria pode ser classificada como:

- ✓ **PIROMETRIA** - Medição de altas temperaturas, na faixa onde os efeitos de radiação térmica passam a se manifestar.
- ✓ **CRIOMETRIA** - Medição de baixas temperaturas, ou seja, aquelas próximas ao zero absoluto de temperatura.
- ✓ **TERMOMETRIA** - Termo mais abrangente que incluiria tanto a Pirometria, como a Criometria que seriam casos particulares de medição.

## ESCALAS DE TEMPERATURA

A primeira escala de temperatura foi a de Fahrenheit em 1714, no qual convencionou 32°F para a temperatura de congelamento de uma mistura entre gelo e amônia e 212°F para a temperatura de ebulição da água. A diferença entre estes pontos foi dividida em 180 partes iguais a qual se deu o nome de grau Fahrenheit.

Mais tarde, Celsius tomando os mesmos dois pontos definiu 0°C para o congelamento da água e 100°C para a ebulição da água, ambas a pressão atmosférica, a qual se deu o nome de grau Celsius ou Centígrados.

Zero Absoluto ou Zero Kelvin é a menor temperatura que um corpo pode alcançar 0 K equivale a  $-273,15^{\circ}\text{C}$ .

As equações de conversão das unidades mais usadas na termometria moderna são:

✓  $^{\circ}\text{C} = \text{K} - 273,15$

✓  $^{\circ}\text{F} = ^{\circ}\text{C} \times 1,8 + 32$

Existem outras escalas como a Rankine e a Réamur, porém são de pouco usos:

✓  $^{\circ}\text{R} = ^{\circ}\text{F} + 459,67$

✓  $^{\circ}\text{Re} = 4/5 \cdot \text{C}$

Sensores, detectores ou elementos primários de temperatura; são transdutores que alteram algumas de suas características físicas ao se equalizar com o meio a ser determinada à temperatura. Como exemplo poderia citar a dilatação do mercúrio num termômetro de vidro, geração de tensão num termopar, a variação de resistência ôhmica num termistor entre outras.

Dos inúmeros tipos de sensores de temperatura existentes, como termômetros de vidro, termômetros bimetalicos termômetros a gás, termistores, termômetros de quartzo, termopares, termoresistencias, termômetros de germânio e outros; os mais utilizados industrialmente e em laboratórios são os termopares e as termoresistencias.

Os termopares são os sensores de maior uso industrial para a medição de temperatura. Eles cobrem uma faixa bastante extensa de temperatura que vai de 200 a  $2300^{\circ}\text{C}$  aproximadamente, com uma boa precisão e repetibilidade aceitável, tudo isto a um custo que se comparado com outros tipos de sensores de temperatura são mais econômicos.

O controle de temperatura é necessário em processos industriais ou comerciais, como a refrigeração de alimentos e compostos químicos, fornos de fusão produção de metais e ligas, destilação fracionada (produção de bebidas e derivados de petróleo),

usinas nucleares e aquecedores e refrigeradores domésticos (fornos elétricos e microondas, freezers e geladeiras).

Monitorar situações como as abordadas requer o conceito de efeito termo resistivo, que consiste em explorar a variação da resistência elétrica produzida por uma determinada variação de temperatura. O valor da resistência elétrica de um material, a uma temperatura “t”, teoricamente.

Os RTD's são elementos detectores resistivos formados por materiais como platina, níquel ou ligas de cobre-níquel. Estes materiais exibem um coeficiente positivo de resistividade e são usados para a fabricação de RTD's porque são estáveis e dotados de capacidade de resposta à variação de temperatura por um longo período de tempo.

O termistor de coeficiente negativo de temperatura (NTC) é um sensor muito conhecido e encontrado no mercado com uma variedade muito grande no tipo construtivo e nos valores de resistência.

Termistor de coeficiente positivo (PTC) é mais raro de ser encontrada, dada sua complexidade no aspecto construtivo, entretanto, no presente trabalho, será um dos sensores avaliados.

**TEMORESISTORES NTC:** Negative Temperature Coefficient, “Coeficiente Negativo de Temperatura”, tem resistência inversamente proporcional à temperatura. Ele é feito de compostos semicondutores, como os óxidos de ferro, magnésio e cromo. A variação da resistência para este tipo de sensor pode ser expressa por:

$$R_T = \frac{A.B.e}{T} \quad (\text{Equação 25})$$

Onde:

$R_T$ : Resistência sob a influência da temperatura [ $\Omega$ ]

A e B: Coeficientes de expansão térmica em função do tipo de material utilizado no sensor  
e: número de euler 2.718

T: Temperatura em Kelvin.

Devido a seu comportamento não linear, o NTC é utilizado numa faixa pequena de temperaturas, em que a curva é próxima de uma reta, ou com uma rede de linearização. Seu comportamento pode ser observado na figura abaixo.

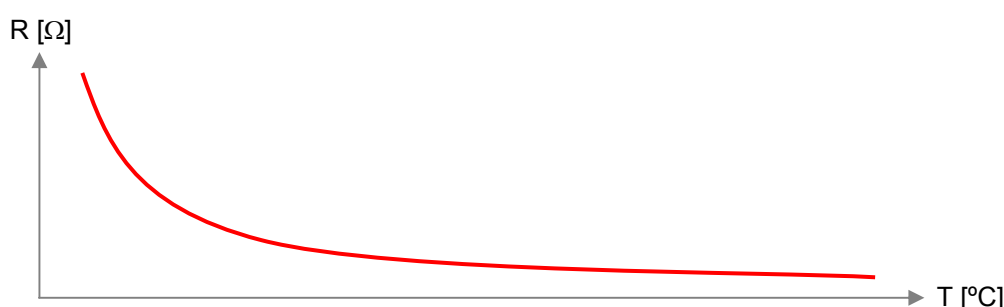


Figura 56 – Curva Característica de um Termistor NTC

**TEMORESISTORES PTC:** Positive Temperature Coefficient “Coeficiente Positivo de Temperatura” tem resistência proporcional à temperatura, e atua numa faixa restrita. A variação da resistência é maior que a de um NTC, na mesma faixa. Seu uso é mais freqüente como sensor de sobre temperatura, em sistemas de proteção, por exemplo, de motores. A variação da resistência para este tipo de sensor pode ser expressa por:

$$R_T = R_0.(1 + A.T + B.T^2) \quad (\text{Equação 26})$$

Onde:

$R_T$ : Resistência sob a influência da temperatura [ $\Omega$ ]

A e B: Coeficientes de expansão térmica em função do tipo de material utilizado no sensor

$R_0$ : Resistência do sensor à 0 °C.

Do mesmo modo que os termo resistores do tipo NTC os Sensores PTC também apresentam um comportamento não linear. Seu comportamento pode ser observado na figura abaixo.

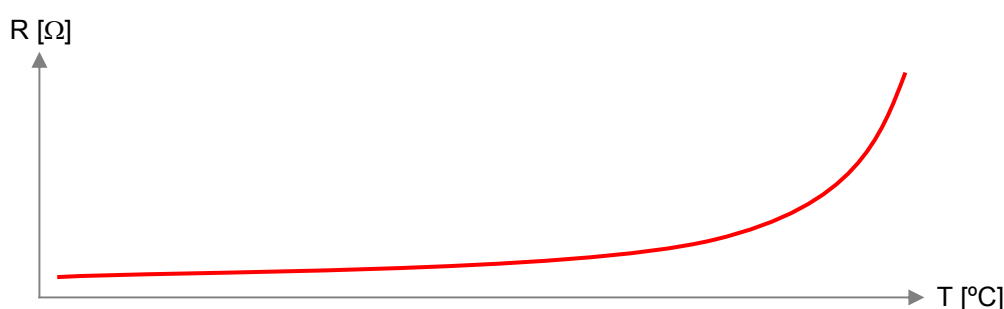


Figura 57 – Curva Característica de um Termistor PTC

**TERMOPAR:** Um termopar consiste de dois condutores metálicos, de natureza distinta, na forma de metais puros ou de ligas homogêneas. Os fios são soldados em um extremo ao qual se dá o nome de junta quente ou junta de medição. A outra extremidade dos fios é levada ao instrumento de medição de f.e.m. (força eletromotriz), fechando um circuito elétrico por onde flui a corrente. O ponto onde os fios que formam o termopar se conectam ao instrumento de medição é chamado de junta fria ou de referência.

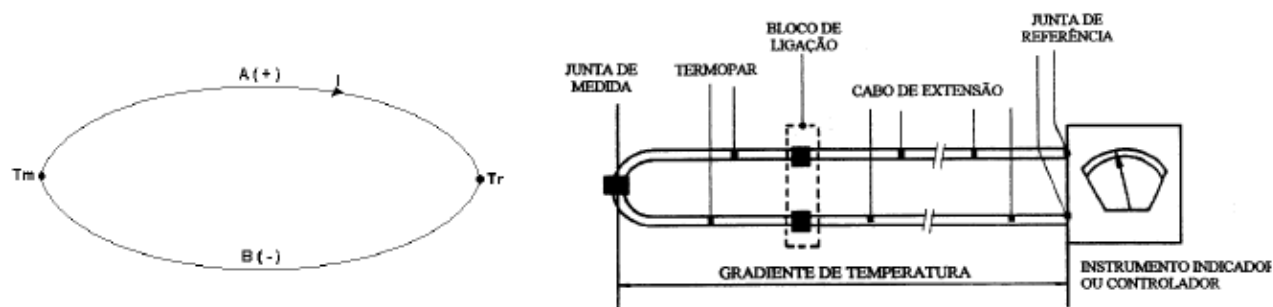


Figura 58 – Diagrama de Funcionamento de um Termopar

O aquecimento da junção de dois metais gera o aparecimento de uma f.e.m. Este princípio conhecido por efeito Seebeck propiciou a utilização de termopares para a medição de temperatura. Nas aplicações práticas o termopar apresenta-se normalmente conforme a figura acima. O sinal de f.e.m. gerado pelo gradiente de temperatura ( $\Delta T$ ) existente entre as juntas quente e frias será de um modo geral indicado, registrado ou transmitido.

## EFEITOS TERMOELÉTRICOS

Quando dois metais ou semicondutores dissimilares são conectados e as junções mantidas a diferentes temperaturas, quatro fenômenos ocorrem simultaneamente: o efeito Seebeck, o efeito Peltier, o efeito Thomson e o efeito Volta.

### EFEITO SEEBECK

O fenômeno da termoeletricidade foi descoberto em 1821 por T.J. Seebeck quando ele notou que em um circuito fechado, formado por dois condutores diferentes A e B, ocorre uma circulação de corrente enquanto existir uma diferença de temperatura ( $T_2 - T_1$ ) entre as suas junções. Denominamos a junta de medição de  $T_m$ , e a outra, junta de

referência de Tr. A existência de uma f.e.m. térmica AB no circuito é conhecida como efeito Seebeck. Quando a temperatura da junta de referência é mantida constante, verifica-se que a f.e.m. térmica é uma função da temperatura  $T_m$  da junção de teste. Este fato permite utilizar um par termoelétrico como um termômetro.

O efeito Seebeck se produz pelo fato de que os elétrons livres de um metal diferem de um condutor para outro e depende da temperatura. Quando dois condutores diferentes são conectados para formar duas junções e estas são mantidas a diferentes temperaturas, a difusão dos elétrons nas junções se produz a ritmos diferentes

## **EFEITO PELTIER**

Em 1834, Peltier descobriu que, dado um par termoelétrico com ambas as junções à mesma temperatura, se, mediante uma bateria exterior, produz-se uma corrente no termopar, as temperaturas da junções variam em uma quantidade não inteiramente devida ao efeito Joule. Esta variação adicional de temperatura é o efeito Peltier. O efeito Peltier produz-se tanto pela corrente proporcionada por uma bateria exterior como pelo próprio par termoelétrico.

O coeficiente Peltier depende da temperatura e dos metais que formam uma junção, sendo independente da temperatura da outra junção. O calor Peltier é reversível. Quando se inverte o sentido da corrente, permanecendo constante o seu valor, o calor Peltier é o mesmo, porém em sentido oposto.

## **EFEITO THOMSON**

Em 1854, Thomson conclui, através das leis da termodinâmica, que a condução de calor, ao longo dos fios metálicos de um par termoelétrico, que não transporta corrente, origina uma distribuição uniforme de temperatura em cada fio.

Quando existe corrente, modifica-se em cada fio a distribuição de temperatura em uma quantidade não inteiramente devida ao efeito Joule. Essa variação adicional na distribuição da temperatura denomina-se efeito Thomson.

O efeito Thomson depende do metal de que é feito o fio e da temperatura média da pequena região considerada. Em certos metais há absorção de calor, quando uma corrente elétrica flui da parte fria para a parte quente do metal e que há geração de calor quando se inverte o sentido da corrente. Em outros metais ocorre o oposto deste efeito, isto é, há liberação de calor quando uma corrente elétrica flui da parte quente para a parte fria do metal. Conclui-se que, com a circulação de corrente ao longo de um fio condutor, a distribuição de temperatura neste condutor se modificará, tanto pelo calor dissipado por efeito Joule, como pelo efeito Thomson.

## **EFEITO DE VOLTA**

A experiência de Peltier pode ser explicada através do efeito Volta enunciado a seguir:

"Quando dois metais estão em contato a um equilíbrio térmico e elétrico, existe entre eles uma diferença de potencial que pode ser da ordem de Volts".

Esta diferença de potencial depende da temperatura e não pode ser medida diretamente.

## **TIPOS DE TERMOPARES**

**TERMOPARES BÁSICOS - E, T, J, K:** São assim chamados os termopares de maior uso industrial, em que os fios são de custo relativamente baixo e sua aplicação admite um limite de erro maior.

### **TIPO E**

Nomenclatura:

E - Adotada pela Norma ANSI

CE - Adotada pela Norma JIS

NiCr-Co

Liga: ( + ) Chromel - Ni ( 90 % ) e Cr ( 10 % )

( - ) Constantan - Cu ( 58 % ) e Ni ( 42 % )

**Características:**

Faixa de utilização: -200 °C a 870 °C

f.e.m. produzida: - 8,824 mV a 66,473 mV

Aplicações: Química e Petroquímica

**TIPO T****Nomenclaturas:**

T - Adotado pela Norma ANSI

CC - Adotado pela Norma JIS

Cu - Co - Cobre - Constantan

Liga: ( + ) Cobre - ( 99,9 % )

( - ) Constantan - São as ligas de Cu-Ni compreendidos no intervalo entre Cu ( 50 % ) e Cu ( 65 % ) Ni ( 35 % ). A composição mais utilizada para este tipo de termopar é de Cu ( 58 % ) e Ni ( 42 % ).

**Características:**

Faixa de utilização: - 200 °C a 370 °C

F.e.m. produzida: - 5,603 mV a 19,027 mV

Aplicações: Criometria ( baixas temperaturas ), Indústrias de refrigeração, Pesquisas agrônômicas e ambientais, Química e Petroquímica.

**TIPO J****Nomenclaturas:**

J - Adotada pela Norma ANSI

IC - Adotada pela Norma JIS

Fe-Co

Ferro - Constantan

Liga: ( + ) Ferro - ( 99,5 % )

( - ) Constantan - Cu ( 58 % ) e Ni ( 42 % ), normalmente se produz o ferro a partir de sua característica casa-se o constantan adequado.



**Características:**

Faixa de utilização: -40 °C a 760 °C

f.e.m. produzida: - 1,960 mV a 42,922 mV

Aplicações: Centrais de energia, Metalúrgica, Química, Petroquímica, indústrias em geral.

**TIPO K****Nomenclaturas:**

K - Adotada pela Norma ANSI

CA - Adotada pela Norma JIS

Liga: ( + ) Chromel - Ni ( 90 % ) e Cr ( 10 % )

( - ) Alumel - Ni( 95,4 % ), Mn( 1,8 % ), Si( 1,6 % ), Al( 1,2 % )

**Características:**

Faixa de utilização: - 200 °C a 1260 °C

f.e.m. produzida: - 5,891 mV a 50,99 mV

Aplicações: Metalúrgicas, Siderúrgicas, Fundição, Usina de Cimento e Cal, Vidros, Cerâmica, Indústrias em geral.

**TERMOPARES NOBRES - S, R, B:** são aqueles que os pares são constituídos de platina. Embora possuam custo elevado e exijam instrumentos receptores de alta sensibilidade, devido à baixa potência termoelétrica, apresenta uma altíssima precisão, dada a homogeneidade e pureza dos fios dos termopares.

**TIPO S****Nomenclaturas:**

S - Adotada pela Norma ANSI

Pt Rh 10 % - Pt

Liga: ( + ) Platina 90% Rhodio 10 %

( - ) Platina 100 %

**Características:**

Faixa de utilização: 0 °C a 1600 °C

f.e.m. produzida: 0 mV a 16,771 mV

Aplicações: Siderúrgica, Fundição, Metalúrgica, Usina de Cimento, Cerâmica, Vidro e Pesquisa Científica.

**TIPO R****Nomenclaturas:**

R - Adotada pela Norma ANSI

PtRh 13 % - Pt

Liga: ( + ) Platina 87 % Rhodio 13 %

( - ) Platina 100 %

**Características:**

Faixa de utilização: 0 °C a 1600 °C

f.e.m. produzida: 0 mV a 18,842 mV

Aplicações: As mesmas do tipo S.

**TIPO B****Nomenclaturas:**

B - Adotada pela Norma ANSI

PtRh 30 % - PtRh 6 %

Liga: ( + ) Platina 70 % Rhodio 30 %

( - ) Platina 94 % Rhodio 6 %

**Características:**

Faixa de utilização: 600 a 1700 °C

f.e.m. produzida: 1,791 mV a 12,426 mV

Aplicações: Vidro, Siderúrgica, alta temperatura em geral.

**TERMOPARES ESPECIAIS:** ao longo dos anos, os tipos de termopares produzidos oferecem, cada qual, uma característica especial porém, apresentam restrições de aplicação, que devem ser consideradas. Novos tipos de termopares foram desenvolvidos para atender as condições de processo onde os termopares básicos não podem ser utilizados:

- ✓ Tungstênio – Rhênio: Esses termopares podem ser usados continuamente até 2300 °C e por curto período até 2750 °C.
- ✓ Irídio 40 % - Rhódio / Irídio: Esses termopares podem ser utilizados por períodos limitados até 2000 °C.
- ✓ Platina - 40% Rhódio / Platina - 20 % Rhódio: Esses termopares são utilizados em substituição ao tipo B onde temperaturas um pouco mais elevadas são requeridas. Podem ser usados continuamente até 1600 °C e por curto período até 1800 °C ou 1850 °C.
- ✓ Ouro- Ferro / Chromel: Esses termopares são desenvolvidos para trabalhar em temperaturas criogênicas.
- ✓ Nicrosil / Nisil: Basicamente, este novo par termoeletrico é um substituto para o par tipo K, apresentando uma força eletromotriz um pouco menor em relação ao tipo K.

## COMPENSAÇÃO DE JUNTA DE REFERÊNCIA

Em alguns casos os termopares possuem compensação de junta de referência, ou seja, normalmente um termopar mede a diferença entre as temperaturas do processo a ser monitorado e o ambiente, a fim de compensar a interferência da temperatura ambiente a compensação de junta de referência faz com que a F.E.M. mostrada no milivoltímetro seja a F.E.M. correspondente ao processo. Em alguns termopares a compensação é fixa em 20 °C ou 25 °C. Neste caso, se a temperatura do ambiente for diferente do valor fixo, o instrumento indicará a temperatura com um erro que será tanto maior quanto for a diferença de temperatura ambiente e o valor fixo. Esta situação pode ser expressa pela equação:

$$F.E.M._{TOTAL} = F.E.M._{JM1} - F.E.M._{JM2} + CJ \quad (\text{Equação 27})$$

Onde:

F.E.M.: Força eletromotriz [V]

F.E.M.<sub>JM1</sub>: Força eletro motriz referente a junta de medição 1 [V]

F.E.M.<sub>JM2</sub>: Força eletro motriz referente a junta de medição 2 [V]

CJ: Compensação de Junta de Referência.

## ASSOCIAÇÃO DE TERMOPARES

Com o objetivo de algumas aplicações especiais, dois ou mais termopares podem ser associados das seguintes formas:

- ✓ Associação Série
- ✓ Associação Série Oposta
- ✓ Associação em Paralelo

**ASSOCIAÇÃO SIMPLES:** dois ou mais termopares podem ser associados em série simples para obter a soma das mV individuais. Este processo também pode ser chamado de termopilha.

A associação em série é usada quando se pretende usar os termopares como conversores termoelétricos.

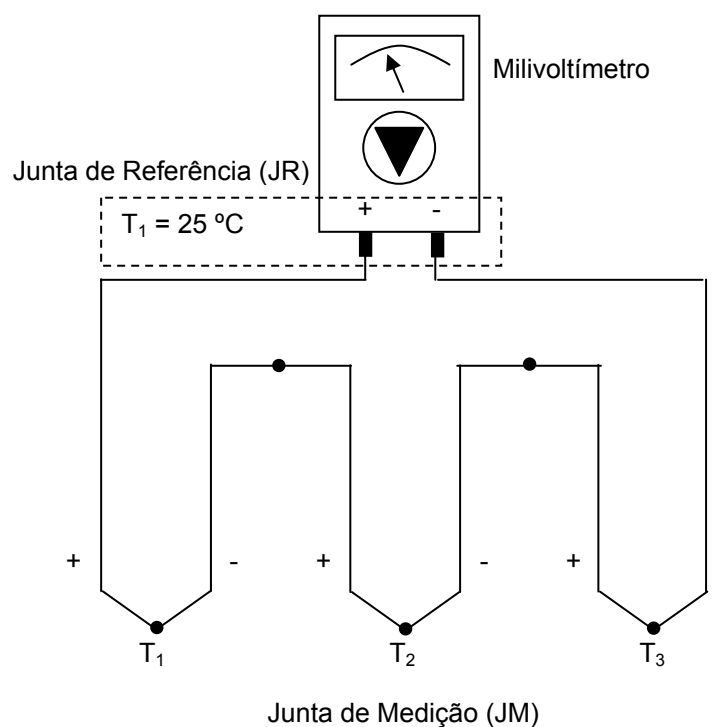


Figura 59 – Termopares Associados em Série

**NOTA:** nesse tipo de associação podem ser usados tantos termopares quanto se deseje, a fim de obter um determinado valor de mV como resposta para alguma aplicação determinada, entretanto é importante que  $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_3$  sejam iguais.

A obtenção da F.E.M. para este tipo de associação será dada pela seguinte expressão:

$$F.E.M._{TOTAL} = \sum_{n=1}^{\infty} F.E.M._n \quad (\text{Equação 28})$$

Onde:

F.E.M.: Força eletro motriz [V]

n: número de termopares na associação

**ASSOCIAÇÃO SÉRIE OPOSTA:** quando se está interessado em diferença de temperaturas e não nos valores obtidos delas, como, por exemplo, as diferenças de temperaturas existentes entre dois pontos dentro da câmara de um forno, cujos termopares devem ser ligados em série oposta. Esta montagem também é conhecida como termopar diferencial.

O termopar de maior temperatura vai ligado ao positivo do instrumento, e o de menor temperatura, ao negativo.

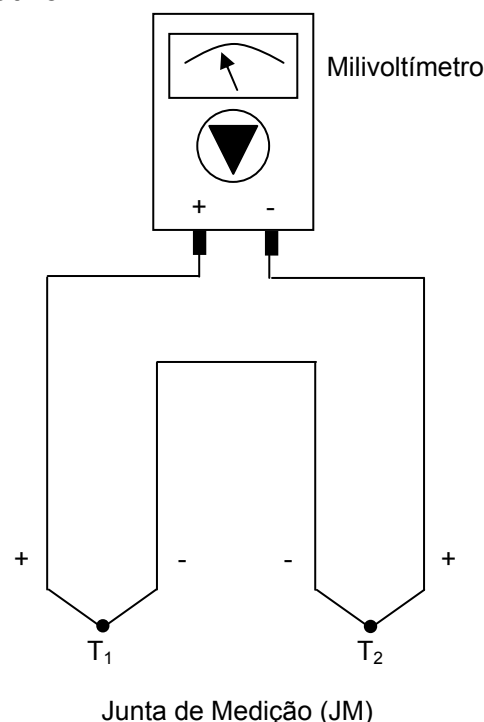


Figura 60 – Termopar Diferencial

A F.E.M. obtida pelo milivoltímetro será a diferença das F.E.M. dos termopares 1 e 2, e pode ser expressa por:

$$F.E.M._{TOTAL} = F.E.M._{JM1} - F.E.M._{JM2} \quad (\text{Equação 29})$$

Onde:

F.E.M.: Força eletromotriz [V]

F.E.M.<sub>JM1</sub>: Força eletromotriz referente a junta de medição 1 [V]

F.E.M.<sub>JM2</sub>: Força eletromotriz referente a junta de medição 2 [V]

**ASSOCIAÇÃO EM PARALELO:** ligando dois ou mais termopares em paralelo a um mesmo instrumento, o valor registrado por este corresponderá à medida das mV geradas nos diversos termopares se as resistências internas foram iguais.

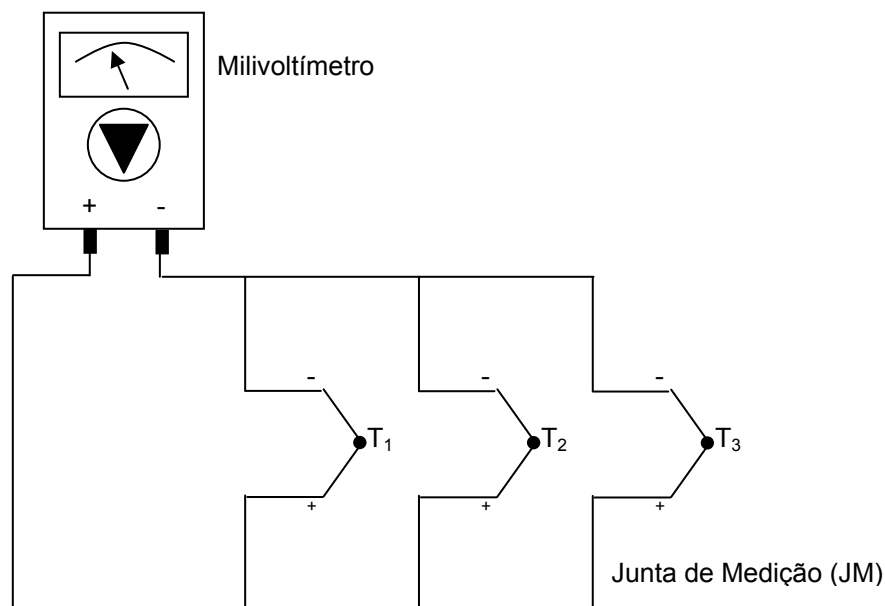


Figura 61 – Termopares Associados em Paralelo

A obtenção da F.E.M. para este tipo de associação será dada pela seguinte expressão:

$$F.E.M._{TOTAL} = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n F.E.M._n \quad (\text{Equação 30})$$

Onde:

F.E.M.: Força eletromotriz [V]

n: número de termopares na associação

**EXERCÍCIOS**

## 1. Relacione os conceitos.

- |  |     |  |
|--|-----|--|
| a. Termopar                              | ( ) | Consiste de dois condutores metálicos, que quando submetidos a diferentes temperaturas (JM e JR) em seus terminais aparece uma F.E.M.  |
| b. PT-100                                | ( ) | Termo resistência com composição em platina que a 0 °C apresenta uma resistência igual à 100 Ohms  |
| c. Associação série oposta de termopares | ( ) | Associação na qual são associados dois termopares sendo que o responsável em medir a maior temperatura é ligado no terminal positivo do voltímetro e o outro pode ser usado como junta de referência.            |
| d. Associação Paralela de termopares     | ( ) | Associação utilizada para medir a temperatura média de um ambiente   |
| e. Pirometria                            | ( ) | Termo mais abrangente que incluiria tanto a Pirometria, como a Criometria que seriam casos particulares de medição.  |
| f. Pirometria                            | ( ) | Medição de altas temperaturas, na faixa onde os efeitos de radiação térmica passam a se manifestar.  |
| g. Criometria                            | ( ) | Medição de baixas temperaturas, ou seja, aquelas próximas ao zero absoluto de temperatura  |
| h. Sensores PTC                          | ( ) | A resistência aumenta em função do aumento da temperatura.   |
| i. Sensores NTC                          | ( ) | A resistência diminui em função do aumento da temperatura.   |
| j. Efeito Seebeck                        | ( ) | Fenômeno que ocorre em um circuito fechado, formado por dois condutores diferentes A e B, ocorre uma circulação de corrente enquanto existir uma diferença de temperatura ( $T_2 - T_1$ ) entre as suas junções. |

2. Complete a Tabela abaixo efetuando as conversões nas escalas termométricas.

Celsius - °C	Fahrenheit - °F	Kelvin - K
0		
	74	
		300
85		
	550	
		30

3. Determine os valores da resistência do sensor Pt-100 sobre a influência das temperaturas:

a. 15 °C

c. 96 °C

e. 300 °C

b. 48 °C

d. 132 °C

f. 550 °C



4. Determine as temperaturas para os valores coletados referente à variação da resistência de um sensor Pt-100.

a. 110  $\Omega$

c. 150  $\Omega$

e. 220  $\Omega$

b. 95  $\Omega$

d. 175  $\Omega$

f. 300  $\Omega$

5. Determine os valores da resistência e tensão (CKT - Ponte  $V_{in} = 10$  Volts) do sensor Pt-100 sobre a influência das temperaturas:

Temperatura [°C]	Resistência [ $\Omega$ ]	Tensão “Vs” - CKT Ponte [V]
0		
50		
100		
150		
200		

6. Esboce as curvas de respostas dos sensores de temperatura PTC e NTC, e explique seu princípio de funcionamento.

7. Em um processo de fabricação está instalado um termopar do tipo “K” com compensação de junta de referência para 20 °C. Durante 8 horas de trabalho foram anotados no mostrador as tensões 1,505 mV e 2,805 mV, referente às temperaturas mínima e máxima respectivamente, atingidos pelo maquinário. Determine os valores das temperaturas sabendo que a sala onde está instalado o maquinário está sob temperatura controlada de 20 °C.

8. Determine a temperatura do processo sabendo que o termopar utilizado é do tipo “K” sem compensação de junta de referência, o ambiente apresenta temperatura de 32 °C e a F.E.M. anotada no termopar é de 4,318 mV.

## SENSORES DE PRESENÇA

São componentes eletrônicos destinados a identificar a presença de objetos, pessoas como:

- ✓ Sensores Ópticos;
- ✓ Sensores Ópticos por Retrorreflexão;
- ✓ Sensores Ópticos por Transmissão;
- ✓ Sensores Ópticos por Reflexão Difusa;
- ✓ Sensores Infravermelhos Ativo;
- ✓ Sensores Infravermelhos Passivo;
- ✓ Janela de Luz;
- ✓ Barreira Ultra-sônica.

**SENSORES ÓPTICOS:** são componentes eletrônicos de sinalização e comando que executam detecção de qualquer material sem que haja contato mecânico.

O princípio de funcionamento baseia-se na existência de um emissor e um receptor. A luz gerada pelo emissor deve atingir o receptor com intensidade suficiente para fazer com que o sensor comute sua saída.

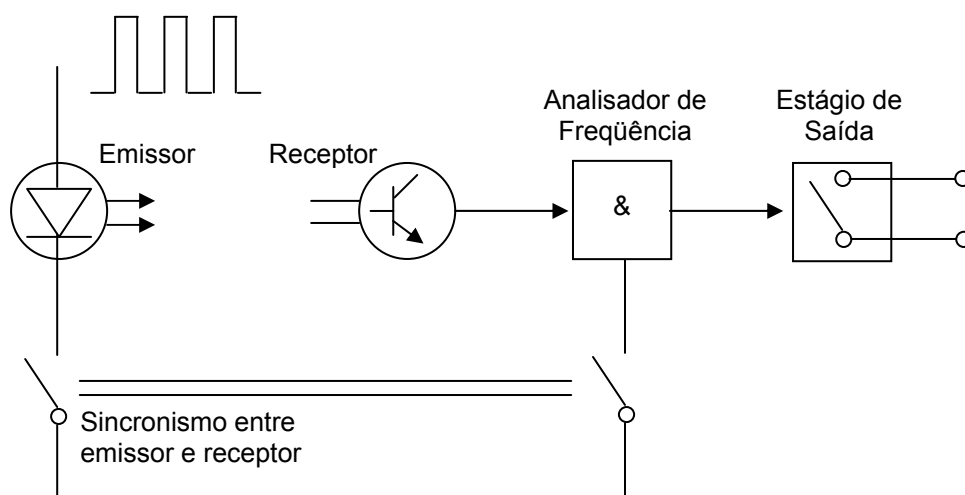


Figura 62 – Princípio de Funcionamento

O detalhamento da operação e componentes de um sensor óptico pode ser visto no diagrama abaixo.

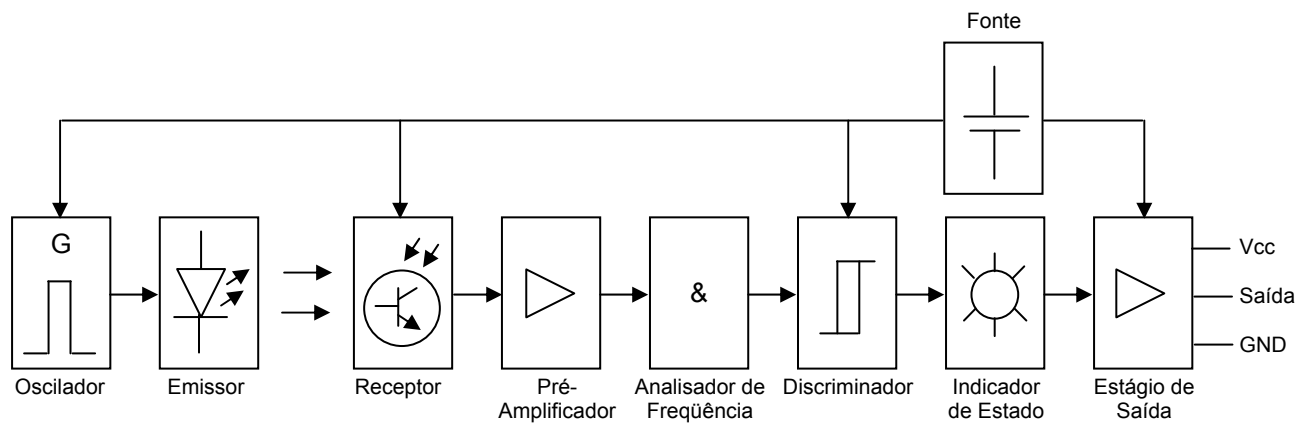


Figura 63 – Diagrama de Blocos de Operação de um Sensor Óptico

- ✓ **Oscilador:** gera um sinal elétrico e envia ao emissor.
- ✓ **Emissor:** transforma o sinal elétrico vindo do oscilador em um feixe de luz pulsante (modulado), sendo executada a emissão do sinal.
- ✓ **Receptor:** converte o sinal de luz pulsante (modulado) em um sinal elétrico modulado.
- ✓ **Pré-Amplificador:** ajusta o sinal elétrico modulado vindo do receptor a níveis compatíveis com o circuito eletrônico do sensor.
- ✓ **Analisador de Frequência:** compara a frequência do sinal recebido pelo receptor com a frequência do sinal gerado pelo emissor, considerando apenas sinais que sejam compatíveis.
- ✓ **Discriminador:** compara o nível do sinal recebido do analisador de frequência com níveis preestabelecidos, definindo o estado do sensor.
- ✓ **Estágio de Saída:** recebe o sinal do discriminador e comuta a carga.
- ✓ **LED:** indicador de estado, senso acionado pelo discriminador.
- ✓ **Fonte:** a alimentação do circuito do sensor é feita por um regulador interno.

**SENSOR ÓPTICO POR RETRORREFLEXÃO:** neste tipo de sensor o emissor e o receptor também estão montados no mesmo corpo. Um feixe de luz é estabelecido entre o emissor e o receptor por intermédio do refletor. O sensor é ativado quando o objeto interrompe o feixe de luz.

Este tipo de sensor possui a distância de acionamento totalmente dependente das características do refletor, sendo as condições desse acessório as seguintes:

- ✓ Limpeza;
- ✓ Dimensão;
- ✓ Instalação;
- ✓ Características construtivas.

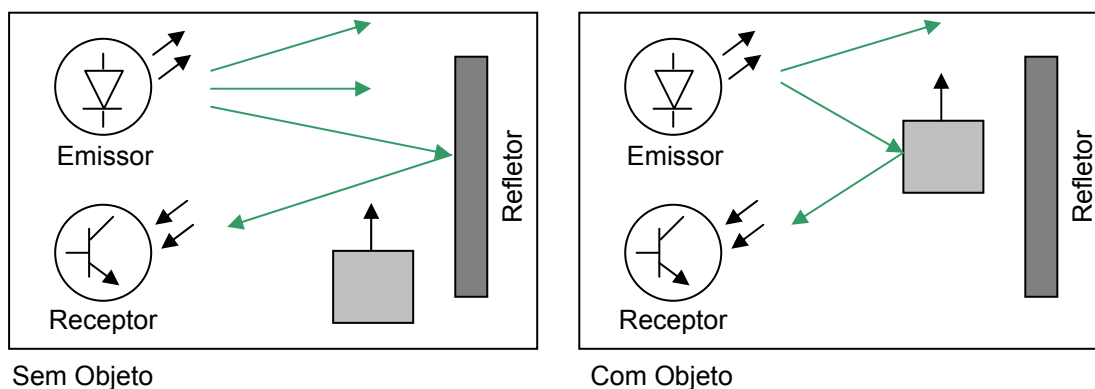


Figura 64 – Sensor Óptico por Retroreflexão

**SENSOR ÓPTICO POR TRANSMISSÃO:** o sensor óptico de detecção de barreira de luz, ou transmissivo, possui o emissor e o receptor montados em dispositivos separados. Ao serem alinhados, os dois componentes criam entre si uma barreira de luz. A presença de um objeto interrompendo esta barreira faz com que o sensor seja ativado.

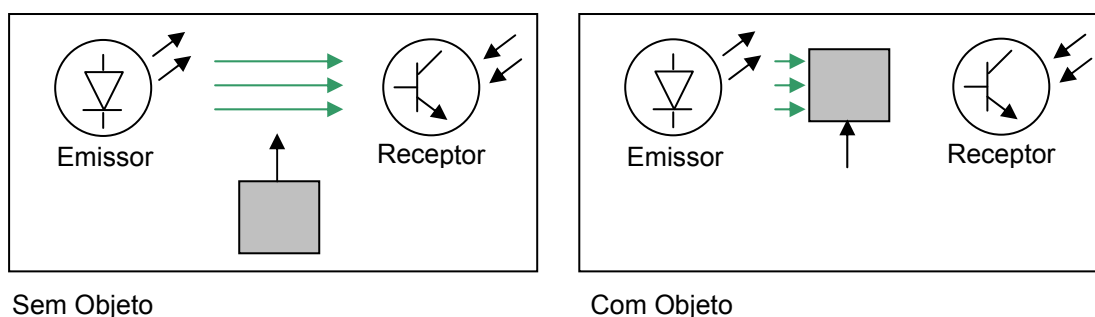


Figura 65 – Sensor Óptico por Transmissão

**SENSOR ÓPTICO POR REFLEXÃO DIFUSA:** este sensor possui emissor e receptor montado no mesmo dispositivo. A luz emitida pelo emissor cria uma região ativa cuja presença de um objeto faz com que a luz seja refletida de forma difusa, de volta ao receptor, ativando o sensor.

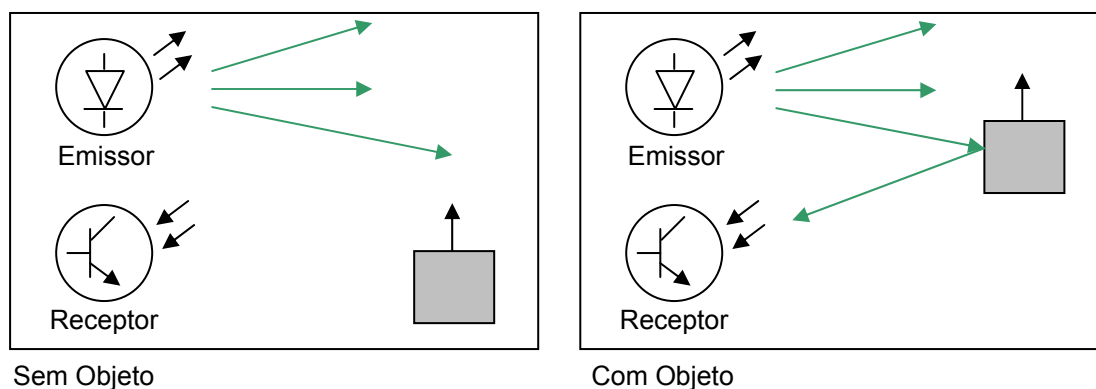


Figura 66 – Sensor Óptico por Reflexão Difusa

**SENSOR INFRAVERMELHO ATIVO:** este tipo de sensor tem o mesmo princípio de funcionamento dos sensores ópticos do tipo barreira, porém utilizados em outro tipo de aplicação, como por exemplo, em alarmes como sistema de controle de intrusão.



Figura 67 – Funcionamento do Sensor Infravermelho Ativo

Constituído por um transmissor e receptor, possui suporte ajustável para fácil alinhamento do feixe. Utilizado em aplicações de segurança como:

- ✓ Alarmes;
- ✓ Proteção perimetral;
- ✓ Iluminação automática;
- ✓ Portas de garagem;
- ✓ Outras.

**SENSOR INFRAVERMELHO PASSIVO:** trata-se de apenas um receptor de infravermelho com ajuste de sensibilidade, pois detecta o calor humano a uma distância razoável (15 a 25m). O elemento sensível desse tipo de sensor é pirométrico integrado.

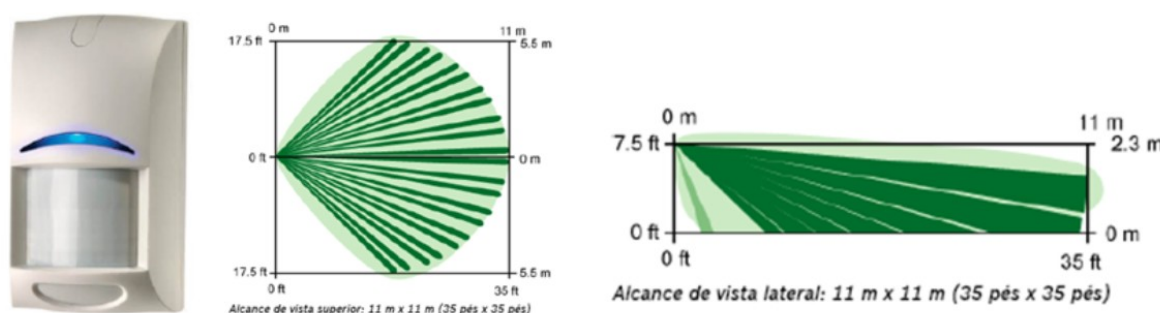


Figura 68 - Sensor IVP e o diagrama de Sensibilidade da Lente.

**JANELA DE LUZ:** funciona da mesma forma que um sensor de infravermelho ativo. A diferença é que ela monitora uma região maior que os sensores IVA. Esses dispositivos são utilizados principalmente em sistemas de segurança de máquinas de indústrias metalúrgicas. Esses dispositivos podem ter desde quatro até vinte feixes de luz entre os elementos sensores.

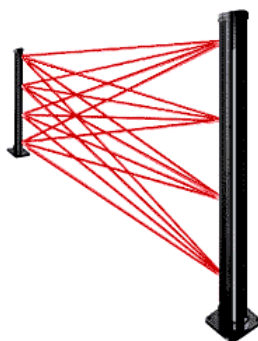


Figura 69 - Sensor de Janela de Luz.

**SENSORES DE ULTRA SOM:** sons extremamente graves ou agudos podem passar despercebidos pelo aparelho auditivo humano, não por deficiência deste, mas por caracterizarem vibrações com frequências muito baixas, até 20Hz (infra-som) ou com frequências muito altas acima de 20 kHz (ultra-som), ambas inaudíveis.

O ultra som já é utilizado pela natureza há muito tempo, os morcegos, golfinhos e outros fazem uso do ultra som para achar comida ou mesmo se guiar. Como é uma frequência acima da audível, pode ser utilizada com muita intensidade. Com a observação do procedimento desses animais desenvolveu-se a idéia do sonar, durante a Segunda Guerra Mundial.



O ouvido humano é capaz de captar frequências entre 20 e 20000 Hz. Os cachorros escutam até 25000 Hz e os morcegos chegam a 50000 Hz. Os sons abaixo de 20 Hz são chamados de infra sons e os acima de 20000 Hz de ultra sons.

As ondas ultra-sônicas são geradas por transdutores ultra-sônicos, também chamados simplesmente de transdutores. Esses transdutores são feitos de materiais piezo-elétrico que apresentam a um fenômeno chamado efeito piezo-elétrico. Ao se colocar um material piezo-elétrico num campo elétrico, as cargas elétricas da rede cristalina interagem com o mesmo e produzem tensões mecânicas. O quartzo e a turmalina, cristais naturais, são piezos-elétricos.

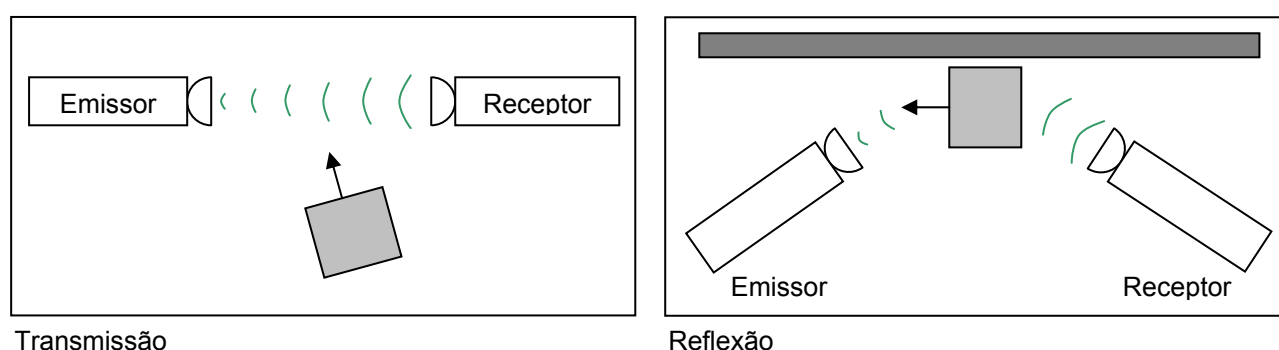


Figura 70 – Transmissor/Receptor Ultra-Sônico

Assim como uma onda sonora, reflete ao incidir num anteparo qualquer, a vibração ou onda ultra-sônica ao percorrer um meio elástico, refletirá da mesma forma, ao incidir num anteparo qualquer, a vibração ou onda ultra-sônica ao percorrer um meio elástico, refletirá da mesma forma, ao incidir numa descontinuidade ou falha interna a este meio considerado. Através de aparelhos especiais, detectamos as reflexões provenientes do interior da peça examinada, localizando e interpretando as descontinuidades.

O uso do ultra-som é muito usado em ensaios não destrutivos para detectar defeitos em peças ferrosas e não ferrosas, o ensaio consiste em fazer o ultra som percorrer a peça e analisando o eco recebido podem-se perceber as deformações internas da peça.

O sonar funciona como um temporizador, que começa a atuar quando a onda sonora de alta frequência é enviada, e mantém-se ativo até o eco da onda retornar ao transdutor.

A velocidade do som no ar a 20 °C é de 330 metros por segundo e no aço de 5900 metros por segundo. Então podemos através do retorno do sinal ou pelo eco, saber a forma e a distancia que está o objeto através da equação: esta ( $s = v.t$ ).

$$s = v.t \quad (\text{Equação 31})$$

Onde:

s: espaço em [m]

v: velocidade de propagação da onda em [m/s]

t: tempo em [s]

**EXEMPLO 1:** Um sinal ultra sônico com frequência de 2 MHz é aplicada a uma peça, qual o comprimento de onda gerado no material?

$$V = \lambda.f$$

No aço  $v = 5900 \text{ m/s}$

$$\lambda = V/f = 5900 / 2.10^6$$

$$\lambda = 2,95 \cdot 10^{-3} \text{ metros ou } 2,95 \text{ mm}$$

O conhecimento do comprimento de onda nestes testes é muito importante, pois, este valor está relacionado com o tamanho físico dos defeitos ou deformidades apresentadas na peça a ser testada.

**EXEMPLO 2:** Um radar envia um sinal, este demora 1 ms para retornar , qual a distancia do objeto?.

$$s = v.t$$

No ar a velocidade do som é de 330 m/s.

$$s = 330 \times 0,001 = 0,33 \text{ m .}$$

## EFEITOS BIOLÓGICOS DO ULTRA-SOM

O ultra-som quando atravessa um tecido é absorvido e pode elevar a temperatura local. As mudanças biológicas devidas a isso seriam as mesmas se a elevação fosse

provocada por outro agente. A taxa de absorção do ultra-som aumenta com sua frequência.

Outro efeito possível numa aplicação ultra-sônica está associado à cavitação, termo usado para descrever a formação de cavidades ou bolhas no meio líquido, contendo quantidades variáveis de gás ou vapor. No caso de células biológicas ou macromoléculas em suspensão aquosa, o ultra-som pode alterá-las estruturalmente e/ou funcionalmente através da cavitação.

A pressão negativa no tecido durante a rarefação pode fazer com que os gases dissolvidos ou capturados se juntem para formar bolhas. O colapso dessas bolhas libera energia que pode romper as ligações moleculares, provocando o aparecimento de radicais livres  $H^+$  e  $OH^-$ , altamente reativos e como consequência, causar mudanças químicas.

Outro efeito biológico que pode ocorrer é devido às denominadas "forças de radiações" que podem deslocar distorcer e/ou reorientarem partículas intercelulares, ou mesmo células com relação às suas configurações normais.

Atualmente, grande número de pesquisas vem sendo realizadas para verificar os efeitos biológicos do ultra-som. Os resultados obtidos até agora conduzem à suposição de que nenhum bioefeito substancial tem sido verificado com feixe ultra-sônico de intensidade inferior a  $100 \text{ mW/cm}^2$ .

Para resumir, podemos enumerar os seguintes efeitos de interesse biológico:

1. **Efeito térmico:** a energia intrínseca das ondas sonoras gera calor ao atravessar o tecido.
2. **Efeito mecânico-vibratório:** Empregado no preparo dos canais radiculares através da instrumentação, coadjuvado pela irrigação simultânea.
3. **Efeito químico:** pela liberação de substâncias ionizantes.
4. **Efeito reflexivo:** característica de atingir o objeto e retornar (como no ecograma).
5. **Fenômeno da cavitação.**

**EXERCÍCIOS**

## 1. Relacione os conceitos.

- |                                      |       |   |
|--------------------------------------|-------|---|
| a. Sensor Óptico por Reflexão Difusa | (   ) | Dispositivos são utilizados principalmente em sistemas de segurança de máquinas de indústrias metalúrgicas.   |
| b. Sensor Óptico por Retrorreflexão  | (   ) | Consiste num sensor que é apenas um receptor de infravermelho com ajuste de sensibilidade.  |
| c. Sensores Ópticos                  | (   ) | Sensor com o mesmo princípio de funcionamento dos sensores ópticos do tipo barreira, porém utilizados em alarmes como sistema de controle de intrusão                 |
| d. Sensores IVP                      | (   ) | São componentes eletrônicos de sinalização e comando que executam detenção de qualquer material sem que haja contato mecânico   |
| e. Sensor Óptico por Transmissão     | (   ) | A luz emitida pelo emissor cria uma região ativa cuja presença de um objeto faz com que a luz seja refletida de forma difusa, de volta ao receptor, ativando o sensor |
| f. Janela de Luz                     | (   ) | Sensor que possui o emissor e o receptor montados em dispositivos separados.  |
| g. Sensores Ópticos                  | (   ) | Componentes eletrônicos de sinalização e comando que executam detenção de qualquer material sem que haja contato mecânico   |
| h. Sensores IVA                      | (   ) | Sensor em que o emissor e o receptor também estão montados no mesmo corpo   |

2. Cite os fatores que influenciam na distância de acionamento dos sensores ópticos por retrorreflexão referente ao refletor.

---

---

---

---

3. Cite aplicações para sensores IVA.

---

---

---

---

4. Cite os efeitos biológicos causados pelas ondas ultra-sônicas.

---

---

---

---

5. Um radar envia um sinal (velocidade de propagação da onda no ar igual à 300 m/s), e este demora 200 ms para retornar , qual a distancia do objeto?.

## SENSORES ÓPTICOS

Estes componentes são sem dúvida os mais utilizados em sistemas de sensoriamento sem fio, sua aplicação se tornou indispensável devido ao baixo nível de ruído e alta confiabilidade. Podemos segundo suas aplicações classificá-los por grupos como segue:

- ✓ Dispositivos de medição, monitoração, controle e teste de fontes de luz;
- ✓ Dispositivos de irradiação sem modulação;
- ✓ Dispositivos de irradiação modulada;
- ✓ Dispositivos para displays alfanuméricos;
- ✓ Dispositivos para gravação e transmissão de imagens;
- ✓ Dispositivos para reprodução de imagens;

**FOTODIODOS:** o fotodiodo é um componente também sensível a luz, ou seja, quando a luz incide sobre sua junção o mesmo gera portadores majoritários conduzindo corrente elétrica. A figura abaixo mostra o símbolo de um fotodiodo:

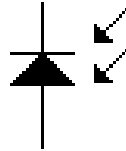


Figura 71 – Simbologia Fotodiodo

**FOTO ACLOPADOR:** Se associarmos um LED a um fotodiodo terá então um opto acoplador, conforme mostra a figura abaixo:

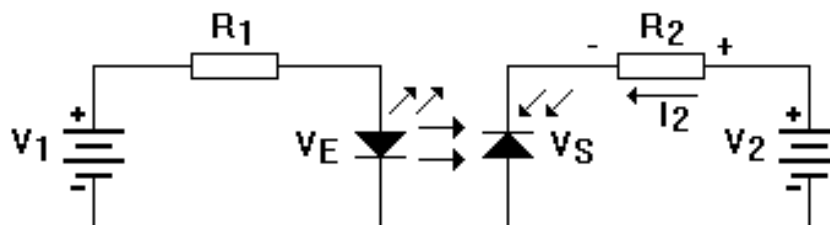


Figura 72 – Opto acoplador

O opto acoplador possui em LED no lado da entrada e um fotodiodo no lado da saída. A tensão da fonte  $V_1$  e o resistor série  $R_1$  produzem uma corrente através do LED. Por sua vez a luz emitida pelo LED atinge o fotodiodo, produzindo a corrente  $I_2$ . Somando as tensões ao longo da malha, temos:

$$V_S(\text{saída}) - V_2 + I_2 R_2 = 0$$

$$V_S(\text{saída}) = V_2 - I_2 R_2$$

No circuito acima a tensão de saída depende da corrente reversa  $I_2$ . Se a tensão de entrada  $V_1$  estiver variando, a quantidade de luz emitida estará também flutuando, o que significa que a tensão de saída também estará flutuando de acordo com a tensão de entrada.

Portanto o opto acoplador é um dispositivo capaz de acoplar um sinal de entrada com um circuito de saída, com a vantagem de possuir uma isolação entre os dois circuitos extremamente elevada, pois o único contato entre esses dois circuitos é um feixe de luz.

**LDR - LIGHT DEPENDENT RESISTOR:** LDR ou resistores que dependem da luz ou foto-resistência, o LDR é um dispositivo semicondutor cuja resistência varia proporcionalmente com a incidência de luz, esta variação depende inclusive do tipo de luz incidente, podemos dizer que sua resistência é dada em função de:  $R=C.L.a$ , onde  $L$  é a luminosidade em Lux e  $C$  e  $a$  são constantes dependentes do processo de fabricação e material utilizado. A figura abaixo mostra um LDR e o seu símbolo de identificação mais comumente encontrado em esquemas e diagramas.

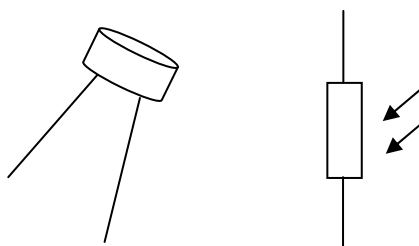
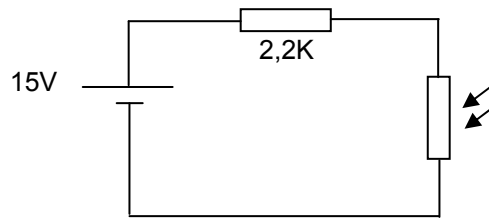


Figura 73 – Simbologia LDR

Outro problema é que existe uma taxa de variação de resistência em função da luz, isto significa que se o LDR está sujeito a uma incidência de luz e esta luz é cortada não significa que a resistência varia instantaneamente, na prática esta variação está em torno de 200 K $\Omega$ /s. Com esta relação podemos calcular, quando o LDR está sem luz resistência alta, quanto tempo vai demorar em atingir uma resistência determinada. A resistência máxima de um LDR deve ficar no escuro total entre 1 e 10 M $\Omega$ .

**EXEMPLO:** Calcular quanto tempo vai demorar para que a tensão entre os terminais de um LDR de  $1\text{ M}\Omega$  em escuro total chegue a  $4\text{V}$ .



### RESOLUÇÃO

1. Com base na lei para circuitos em série aplicamos a primeira lei de Ohm sobre o resistor de  $2,2\text{k}\Omega$  sabendo que o mesmo terá queda de tensão igual a  $11\text{V}$  quando a queda de tensão no LDR atingir  $4\text{V}$ .

$$U = R.I \Rightarrow I = \frac{U}{R} \Rightarrow I = \frac{11}{2200} \therefore I = 0,005\text{A}$$

2. Com a posse do valor de corrente que circula no circuito podemos encontrar a resistência do LDR quando o mesmo apresentar uma queda de tensão de  $4\text{V}$ .

$$U = R.I \Rightarrow R = \frac{U}{I} \Rightarrow R = \frac{4}{0,005} \therefore R = 800\Omega$$

3. Sabe-se que o LDR varia a resistência cerca de  $200\text{ K}\Omega/\text{s}$ , senso assim podemos estabelecer o tempo através de uma relação direta com o valor do LDR em escuro total, ou seja,  $1\text{ M}\Omega$ .

$$\frac{200\text{K}\Omega}{1\text{M}\Omega} = \frac{1\text{s}}{T_s} \Rightarrow T_s = \frac{1\text{M}\Omega \cdot 1}{200\text{K}\Omega} \therefore T_s = 5\text{s}$$



**FOTO TRANSISTOR:** Este componente é parecido com um foto diodo, porem alem de ter uma resposta mais lenta a incidência de luz, pode também vir com três terminais, a fim de permitir uma possível polarização, seu encapsulamento é transparente, afim de permitir a entrada de luz, um transistor comum se estiver sem encapsulamento comporta-se como um foto transistor, mas exposto ao ar sua junção se danifica.

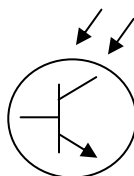


Figura 74 – Simbologia Foto-Transistor

**FOTO TIRISTOR LASCR (Light Activeted SCR):** LASCR são SCR's cujo sinal de gate pode ser dado pela incidência de luz, ou seja, o SCR vai conduzir quando incidir luz no terminal de gate. Como suas características são iguais à de um SCR, a partir do momento da incidência de luz o mesmo só deixará de conduzir quando houver inversão de polaridade ou desligar o sinal de entrada.

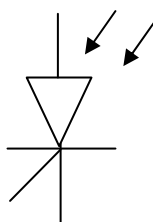


Figura 75 – Simbologia LASCR

**VÁLVULAS DE ULTRAVIOLETA:** dispositivos que indicam a presença de partículas sólidas, vapores e/ou gases que compõem a fumaça de chamas. São utilizadas em ambientes em que a chama é o primeiro indício de fogo.

O sensor de chama é sensível aos raios ultravioleta que se fazem presentes sempre que existe fogo. Por suas características de projeto esse detector discrimina outras formas de raios sendo imune à luz natural.

## APLICAÇÕES

Os detectores de chamas são recomendados nas seguintes aplicações:

- ✓ Áreas abertas ou semi-abertas nas quais ventos podem dissipar a fumaça, impedindo a ação dos detectores de temperatura ou de fumaça;
- ✓ Áreas em que a chama possa ocorrer rapidamente, tais como: hangares, áreas de produção petroquímica, áreas de armazenagem e transferência, instalações de gás natural, cabines de pintura, ou áreas de solventes.
- ✓ Áreas ou instalações com alto risco de Incêndio, freqüentemente conjugadas com um sistema de extinção automático

**CÉLULA FOTOVOLTAICA:** Células Fotoelétricas ou fotovoltaicas são dispositivos capazes de transformar a energia luminosa, proveniente do Sol ou de outra fonte de luz, em energia elétrica. Uma célula fotoelétrica pode funcionar como geradora de energia elétrica a partir da luz, ou como um sensor capaz de medir a intensidade luminosa.

O efeito fotovoltaico foi descoberto por Albert Einstein em 1905. Ele afirmou que para um elétron escapar da superfície de um metal, é preciso fazer um trabalho contra as forças que o fixam, ou seja, os fotoelétrons devem adquirir energia suficiente para serem ejetados. Atualmente materiais semicondutores são utilizados na fabricação de dispositivos fotoelétricos.

**EXERCÍCIOS**

1. Descreva o funcionamento dos sensores ópticos.

---

---

---

---

3. Descreva o funcionamento dos fotodiodos.

---

---

---

---

4. Descreva o funcionamento dos LDR.

---

---

---

---

5. Cite aplicações para válvulas de ultravioleta.

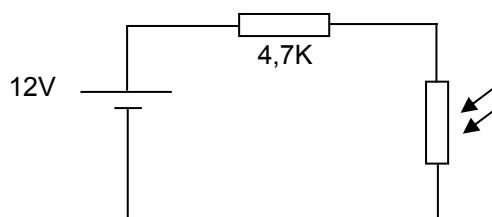
---

---

---

---

6. Calcule o tempo que vai demorar para que a tensão entre os terminais de um LDR de  $10\text{ M}\Omega$  em escuro total chegue a  $2\text{V}$  .



## MEDIDA DE VELOCIDADE

Na maioria dos processos industriais, a velocidade é uma das principais variáveis a ser controlada. Torna-se então extremamente necessário a medição desta variável de maneira eficiente e precisa, uma vez que uma variação mesmo que mínima na velocidade pode acarretar em uma disformidade no produto final. Além disto, quanto maior a velocidade de um processo ou de uma linha de produção maior será a produtividade. Classifica-se a velocidade em:

- ✓ **Velocidade Linear:** Velocidade descrita em um movimento retilíneo. É dada pela razão do deslocamento  $Dx$ , ocorrido durante um intervalo de tempo  $Dt$  tendendo a zero, por esse intervalo de tempo.
- ✓ **Velocidade Angular:** Velocidade descrita em um movimento de rotação em torno de um eixo fixo, chamado de eixo de rotação. É descrita como a razão do deslocamento angular  $Du$ , ocorrido durante um intervalo de tempo  $Dt$  tendendo a zero, por esse intervalo de tempo

**TACÔMETRO:** O tacômetro, ou mais precisamente gerador tacométrico é um pequeno gerador “DC” acoplado a um eixo rotativo. Montado no eixo de um servo motor ou acoplado a este, fornece uma tensão de saída que é função da rotação do eixo.

Muitas vezes chamados de geradores, os tacômetros produzem uma tensão proporcional à velocidade, consumindo uma potência extremamente pequena. Existe um erro no sinal de saída, devido a desvios no acoplamento, que pode chegar a 0,5%. Em alguns casos isto pode acarretar sérios problemas, como por exemplo, o de se controlar a velocidade do motor a 2000 rpm. O erro acarretaria em uma velocidade final de 1990 rpm, não admitido em algumas aplicações.

Um tacômetro (Figura 76) utiliza o magneto permanente “DC” ou campo auto-excitado, para produzir uma tensão proporcional a sua velocidade de rotação. É usado como um transdutor, convertendo a velocidade do eixo de rotação para uma tensão DC proporcional. Em um taco-gerador “DC” o ímã permanente fornece um fluxo magnético constante no núcleo do entreferro.

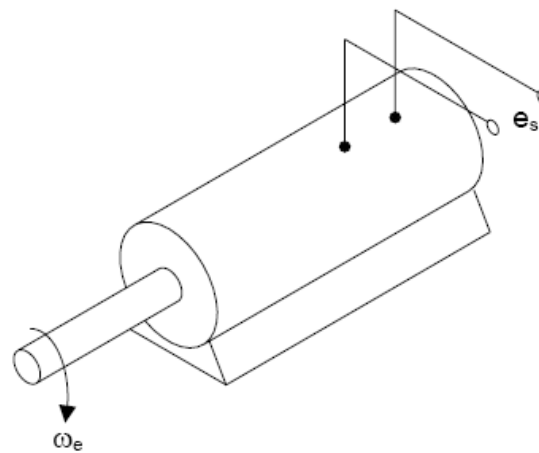


Figura 76 – Tacômetro

## MEDIDA DE ACELERAÇÃO

Medidores sísmicos são transdutores baseados no princípio de forças que agem sobre uma massa inercial, provocando deformações em um elemento elasto-dissipativo (em geral um elemento cerâmico piezo elétrico). A medida de deformação do elemento piezo elétrico é uma medida do movimento da base do sensor. A Figura 77 ilustra o princípio de funcionamento de um sensor sísmico.

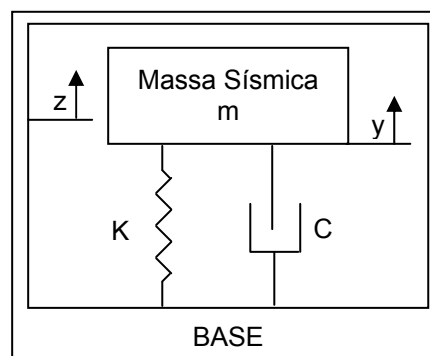


Figura 77 – Sensor Sísmico

Os sensores sísmicos podem ser do tipo deslocamento, velocidade ou aceleração. As faixas de operação dos sensores sísmicos de deslocamento e velocidade são tipicamente altas em frequência, quando comparada com a frequência natural do conjunto massa-mola amortecedora, constituinte no sensor. Os sensores sísmicos de aceleração por sua vez operam em faixas de frequência mais baixas do que aquelas de sua frequência natural. A fixação dos sensores sísmicos pode ser realizada através de colagem, utilização de base magnética, rosqueamento ou mesmo aplicação de cera de abelha.

**APLICAÇÃO**

Os sensores sísmicos são empregados em procedimentos de acompanhamento de vibração de estruturas e máquinas, constituindo uma forma direta e simples de se medir o movimento das mesmas, ainda quando não se possui um ponto fixo de referência dos movimentos.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

THOMAZINE, D. e ALBUQUERQUE, P. U. B. - Sensores Industriais - Fundamentos e Aplicações, Editora Érica, São Paulo, 2006.

FIALHO, A. B. - Instrumentação Industrial - Conceitos, Aplicações e Análise, Editora Érica, São Paulo, 2006.

CALIL, B. M. - Apostila de Sensores, Editora Reman, Taubaté, 2002.

WIKIPEDIA - Definições Sensores e Transdutores, 2008. Disponível em <<http://pt.wikipedia.org>> Acesso em 25 mai. 2008.